

УДК 550.34

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДИНАМИКИ СЕЙСМИЧНОСТИ КАМЧАТКИ

© 2013 г. В. А. Салтыков, Ю. А. Кугаенко, Н. М. Кравченко, А. А. Коновалова

Камчатский филиал Геофизической службы РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: salt@emsd.ru

Поступила в редакцию 18.06.2012 г.

Представлен комплекс параметров сейсмичности, оцениваемый в Камчатском филиале Геофизической службы РАН по данным регионального каталога в целях оперативного мониторинга сейсмической обстановки в регионе. Исследования направлены на обнаружение изменений фонового сейсмического режима (сейсмических затиший и активизаций) в объемах среды, прилегающих к развивающемуся очагу сильного землетрясения. Комплекс методик включает оценку уровня сейсмичности региона по шкале “СОУС’09”; расчет вариаций наклона графика повторяемости, выявление статистически значимых аномалий наклона графика повторяемости с помощью Z -теста, расчет сейсмической активности A_{10} ; мониторинг параметра RTL и вариаций площади сейсмогенных разрывов; обнаружение с помощью Z -теста областей статистически значимого уменьшения скорости потока землетрясений; выявление кластеризации землетрясений. Приведены примеры проявления аномалий этих параметров сейсмичности перед сильными землетрясениями на Камчатке.

DOI: 10.7868/S0203030613010069

ВВЕДЕНИЕ

В 1961–1962 гг. на Камчатке и Командорских островах была создана региональная сеть сейсмических станций, что послужило началом детальных сейсмологических наблюдений в одном из наиболее сейсмоактивных регионов России. Сеть динамично развивалась, и в настоящее время представляет собой систему сейсмологических наблюдений, отвечающую современным мировым требованиям, и включает 68 сейсмических станций и пунктов регистрации сильных движений, а также средства оперативной передачи, автоматической и автоматизированной обработки и хранения сейсмической и геофизической информации [Гордеев и др., 2006в; Чебров и др., 2011]. Система обеспечивает эффективный мониторинг сейсмической и вулканической активности, а также задачи службы предупреждения о цунами.

За 50-летний период наблюдений в результате большого целенаправленного труда коллектива сейсмологов Камчатки создан один из наиболее полных мировых массивов сейсмологической информации — камчатский региональный каталог [Гордеев и др., 2008]. Описанию сейсмичности Камчатки и прилегающих территорий посвящено большое количество публикаций, например [Федотов и др., 1985, 1987; Гордеев и др., 2006а; Левина и др., 2011]. Детальная информация о происхо-

дящих сейсмических событиях, происходящих в зоне ответственности камчатской региональной сети, отражена в научных ежегодниках “Землетрясения СССР (1964–1991 гг.)”, “Землетрясения России (2003–2009 гг.)”, “Землетрясения Северной Евразии (1992–2005 гг.)”. В настоящее время высокий современный уровень организации работ по сбору и обработке сейсмологической информации позволяет не только определять пространственное положение и энергетические характеристики зарегистрированных землетрясений, но и оперативно отслеживать параметры сейсмического процесса. Эти работы имеют как фундаментальную научную, так и прикладную направленность: аномалии в динамике сейсмичности могут иметь предвестниковый характер и используются для прогноза сильных землетрясений [Моги, 1988; Соболев, 1993, 2011; Соболев, Пономарев, 2003; Sobolev, 2011; Wyss, Habermann, 1988]. Актуальность таких исследований на Камчатке, в одном из наиболее сейсмоопасных регионов мира, не вызывает сомнений.

В 1996 году в Камчатской опытно-методической сейсмологической партии (в настоящее время — Камчатский филиал) Геофизической службы РАН было создано специализированное научное подразделение для комплексного анализа

сейсмического процесса, которое в 2001 г. было преобразовано в Лабораторию сейсмического мониторинга. В качестве основных задач подразделения были выдвинуты разработка и внедрение методик слежения за параметрами сейсмического процесса, оперативная оценка текущей сейсмической обстановки и подготовка экспертных заключений по состоянию и прогнозу сейсмической активности Камчатки.

Процессы подготовки сильного землетрясения характеризуется, в частности, изменениями сейсмического режима в прилегающих к будущему очагу объемах среды [Соболев, 2011]. Анализ текущей сейсмической обстановки региона и контроль пространственно-временного распределения фоновой сейсмичности позволяет выявлять такие аномалии в оперативном режиме. В статье представлен комплекс параметров сейсмичности, оцениваемый в Камчатском филиале Геофизической службы РАН по данным регионального каталога в целях оперативного мониторинга сейсмической обстановки в регионе. Приведены примеры проявления аномальных значений этих параметров перед сильными землетрясениями.

Исходные материалы

Информационной основой при применении алгоритмов анализа фоновой сейсмичности является камчатский региональный каталог, полученный за годы детальных сейсмологических наблюдений и непрерывно пополняемый [Гордеев и др., 2008]. Характер используемых землетрясений определяется особенностями региональной сейсмичности. В целом доминирующая роль в камчатском региональном каталоге принадлежит субдукционным землетрясениям.

Оценки параметров сейсмичности рассчитываются нами для района, ограниченного широтой $\varphi = 50.5^\circ$ с.ш. и 56.5° с.ш., долготой $\lambda = 156.0^\circ$ в.д. и 167.0° в.д., глубиной от 0 до 300 км, в который попадает наиболее сейсмоактивная часть Камчатки (рис. 1). Поэтому нижний энергетический уровень землетрясений был определен как $K = 8.5$ по энергетической классификации С.А. Федотова [Федотов, 1972], что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [Чебров и др., 2011].

Существенное искажение в характеристики фоновой сейсмичности в силу своего компактного расположения в пространстве-времени могут вносить афтершоки сильного землетрясения, которые являются наиболее часто встречающимся случаем

группируемых зависимых сейсмических событий. В частности, авторами статьи было проведено исследование искажений, вносимых зависимыми землетрясениями в оценку наклона графика повторяемости [Коновалова, Салтыков, 2008], которое подтвердило этот тезис. Число группированных землетрясений в среднем за все время детальных наблюдений (50 лет) составляет почти четверть всех землетрясений с энергетическим классом K не менее 8.5. Поэтому все оценки, за исключением особо оговоренных случаев, получены по каталогу с удаленными афтершоками. Идентификация афтершоков проведена по методике Молчана-Дмитриевой [Молчан, Дмитриева, 1991].

Моментные магнитуды землетрясений M_W приведены в данной статье по Global CMT Catalog (www.globalcmt.org).

Оценка выделившейся сейсмической энергии

Состояние сейсмичности региона оценивается по эмпирической функции распределения, выделившейся за определенный временной интервал сейсмической энергии $F(K) = P(\lg E \leq K)$, где E – суммарная сейсмическая энергия в Дж в заданном интервале времени, $P(\lg E \leq K)$ – относительная частота временных интервалов с эквивалентным энергетическим классом $\lg E$ не более заданного K .

Функция распределения энергии E , построенная по значениям сейсмической энергии в скользящем временном окне определенной ширины, позволяет определить вероятность для любого значения E с оценкой точности. При этом появляется возможность дать оперативную оценку уровня текущей сейсмичности в качественных терминах. Оперативность достигается тем, что энергия конкретного пространственно-временного блока определяется наиболее сильными событиями, и поэтому, во-первых, является устойчивым параметром, мало зависящим от относительно слабых землетрясений, и, во-вторых, отпадает необходимость использовать землетрясения всего регистрируемого диапазона [Салтыков, 2011].

На рис. 2 приведена функция распределения годовой сейсмической энергии, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2011 гг., отмечены значения соответствующие 2009, 2010 и 2011 гг. Общая выделившаяся сейсмическая энергия составила $2.6 \cdot 10^{13}$ Дж в 2009 г., $1.8 \cdot 10^{14}$ Дж в 2010 г. и $2.1 \cdot 10^{14}$ Дж в 2011 г. при среднегодовом (за 50 лет) значении $5.8 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.6 \cdot 10^{14}$ Дж.

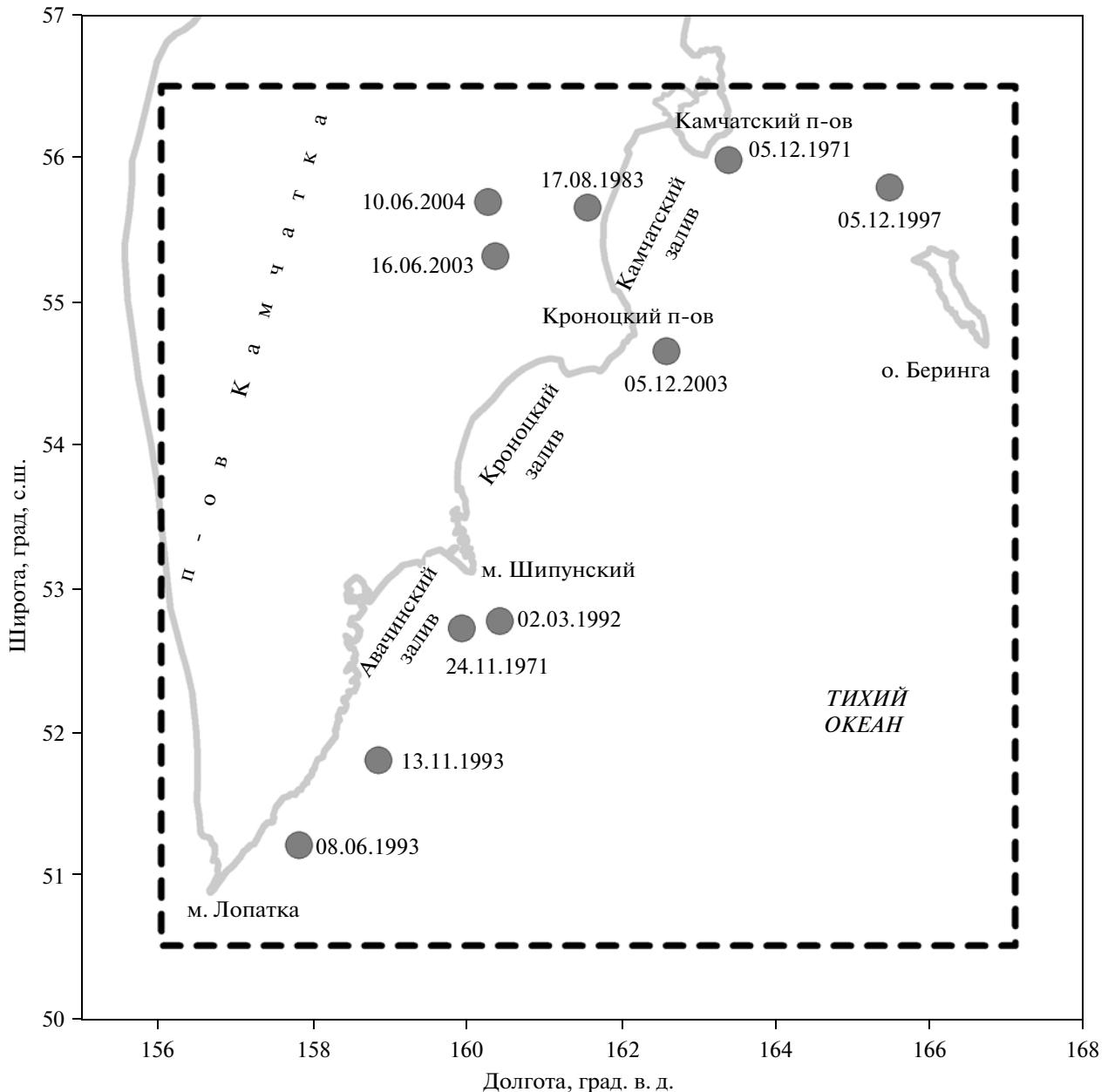


Рис. 1. Область, в которой ведется мониторинг параметров сейсмичности Камчатки (прямоугольник, ограниченный пунктирной линией), и эпицентры землетрясений с $K \geq 14.0$, произошедшие на глубинах до 300 км за время детальных наблюдений (1962–2011 гг.).

В работе [Салтыков, 2011] предложена шкала уровня сейсмичности “СОУС’09”, определяющая уровень сейсмичности, исходя из величины функции распределения F . Шкала включает пять основных градаций (экстремально низкий – $F < 0.005$, низкий – $0.005 < F < 0.025$, фоновый – $0.025 < F < 0.975$, высокий – $0.975 < F < 0.995$, экстремально высокий – $F > 0.995$) и три дополнительных (фоновый пониженный – $0.025 < F < 0.15$, фоновый средний – $0.15 < F < 0.85$, фоновый повышенный – $0.85 < F < 0.975$).

Согласно функции распределения годовой сейсмической энергии, построенной для интервала времени 1962–2011 гг., в 2009 г. был отмечен самый низкий за все время детальных наблюдений уровень сейсмичности. Функция распределения сейсмической энергии 2009 г. составляет 0.028 ± 0.024 . Сейсмическая энергия, выделившаяся в течение 2010 г. и 2011 г., близка к медианному значению, а уровень сейсмичности определяется как фоновый средний. Соответствующие значения функции распределения в 2010 и 2011 гг. равны 0.53 ± 0.07 и 0.58 ± 0.07 . Следует отметить, что первую половину

2010 г. сейсмичность для временного окна 1 год находилась на уровне, минимальном за все время детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. Землетрясение 30.07.2010 г. $M_w = 6.3$ изменило уровень сейсмичности в этом временном окне на фоновый средний.

Рис. 3 отражает вариации оценок уровня сейсмичности Камчатки в 2009–2011 гг. для разных временных окон в соответствии со шкалой “СОУС’09”. Интересным фактом представляется снижение регионального уровня сейсмичности в коротком временном окне перед сильными землетрясениями. Так снижение регионального уровня сейсмичности в июле и ноябре 2010 г. предвещало землетрясения 30.07.2010 г. ($M_w = 6.3$) и 16.11.2010 г. ($M_w = 5.9$) на юго-востоке Авачинского залива. Перед землетрясением 20.02.2011 г. ($M_w = 6.1$, Камчатский залив) отмечено снижение регионального уровня сейсмичности во временных окнах, длина которых меньше 90 суток: уровень сейсмичности Камчатки в предшествующую землетрясению неделю был экстремально низким, предшествующие 15 дней – низким, предшествующие 90 дней – фоновым пониженным.

Мониторинг вариаций фоновой сейсмичности: методики и примеры

Многочисленные исследования сейсмического процесса и результаты лабораторного моделирования очага разрушения подтверждают, что в очаге будущего землетрясения последовательно сменяются две стадии: затишье и активизация фоновой сейсмичности, например [Соболев, 1999; Соболев, Пономарев, 2003] (дополнительно: см. библиографию к монографии [Соболев, Пономарев, 2003]). При этом явление затишья наблюдается почти перед всеми сильными землетрясениями, что, исходя из модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, свидетельствует о наличии стадии накопления энергии в процессе подготовки землетрясения. Форшоковая активизация в ряде случаев может быть трудноуловимой из-за небольшой энергии форшоков.

Регулярная оценка сейсмической обстановки с целью выделения прогностических пространственно-временных аномалий фоновой сейсмичности ведется на Камчатке по комплексу методик, который включает:

- расчет вариаций наклона графика повторяемости;
- расчет сейсмической активности A_{10} ;
- мониторинг параметра RTL ;

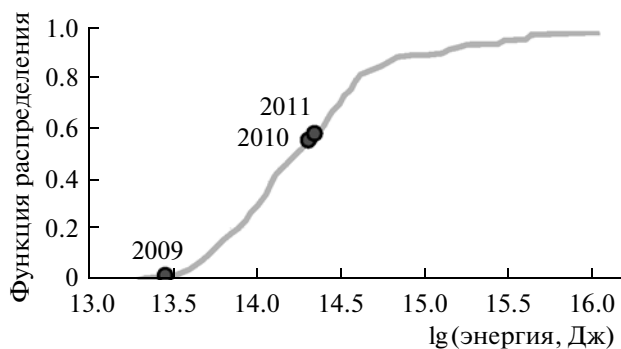


Рис. 2. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при камчатских землетрясениях в 1962–2011 гг. в области мониторинга, обозначенной на рис. 1. Отмечены значения функции распределения, соответствующие 2009, 2010 и 2011 гг.

- выявление сейсмических затиший по методике “Z-функция”;
- мониторинг вариаций площади сейсмогенных разрывов;
- выявление кластеризации землетрясений.

Методики кратко представлены в табл. 1. Более детальное описание алгоритмов и примеры результатов их использования (как в различных районах мира, так и на Камчатке) можно найти в публикациях, на которые приведены ссылки в табл. 1, а также в их библиографиях.

Программное обеспечение всех рассмотренных методик создано в Камчатском филиале Геофизической службы РАН.

Для визуализации результатов мониторинга строятся карты пространственного распределения, графики временного хода параметров сейсмического режима и используются другие графические представления (рис. 4–9).

Рассмотрим примеры параметрического представления динамики сейсмичности.

Среднемноголетние (1962–2008 гг.) значения наклона графика повторяемости γ для наиболее сейсмоактивного района Камчатки составляют 0.500 ± 0.003 . Временные изменения параметра γ анализируются нами на основе безразмерной величины Z_γ , являющейся мерой статистической значимости отклонений текущих значений параметра γ от его долговременных (фоновых) значений:

$$Z_\gamma = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}},$$

γ_1 и γ_2 – значения наклона графика повторяемости землетрясений за сравниваемые интервалы времени; σ_1 и σ_2 – значения среднеквадратичного отклонения оценок γ_1 и γ_2 [Коновалова, Салты-

Таблица 1. Краткая характеристика методик, применяемых для мониторинга параметров сейсмичности Камчатки

Методика. Краткое описание	Публикации результатов успешного применения методики в различных регионах мира	Публикации результатов применения методики на Камчатке
<p>Выявление статистически значимых вариаций наклона графика повторяемости γ Наклон графика повторяемости, связывающий число произошедших землетрясений с выделившейся сейсмической энергией, является одной из основных характеристик сейсмического режима. Увеличение γ соответствует увеличению доли слабых землетрясений, а уменьшение – увеличению доли сильных землетрясений. Для выявления пространственно-временных блоков со статистически значимым изменением γ используется статистическая функция Z-тест. В предлагаемом подходе приоритетной является статистическая значимость изменения γ, а не его абсолютная величина. Пример: рис. 4.</p>	<p>[Завьялов, 2006; Моги, 1988; Aki, 1965; Chan, Wu, 2012; Enescu, Ito, 2001; Imoto, 1991; Nuannin, 2006; Nuannin et al., 2005; Oncell, Wilson, 2007; Parsons, 2007; Wu, Chiao, 2006; Wu et al., 2008; Wyss, Wiemer, 2000; Zuniga, Wyss, 2001]</p>	<p>[Завьялов, 1984; Землетрясения России, 2009–2011; Коновалова, Салтыков, 2010; Салтыков, Кравченко, 2009, 2010]</p>
<p>Методика RTL Методика разработана под руководством Соболева в Институте физики Земли РАН [Соболев и др., 1996, Соболев, Тюпкин, 1996, 1998] в целях среднесрочного прогноза сильных землетрясений. В основу прогнозного признака заложена идея о взаимосвязи и взаимовлиянии землетрясений. <i>RTL</i> – комплексный параметр, отражающий влияние сейсмичности на анализируемую точку. Зона подготовки сильного землетрясения соответствуют пространственно-временные области с отрицательными значениями параметра <i>RTL</i>. Аномалия характеризуется минимальным значением <i>RTL</i> за все время ее развития и продолжительностью, определяемой как интервал времени, в течение которого параметр <i>RTL</i> < -3. Пример: рис. 5.</p>	<p>[Соболев, 2003, 2007; Соболев, Пономарев, 2003; Chen, Wu, 2006; Gentili, Bressan, 2007; Giovambattista, Tyupkin, 1999, 2000, 2004; Huang, 2004, 2006; Huang et al., 2001, 2002; Huang, Naga, 2002; Huang, Sobolev, 2002; Rong, Li, 2007; Sobolev et al., 2002; Wyss et al., 2004]</p>	<p>[Гордеев и др., 2006б; Землетрясения России, 2009–2011; Иванов, Салтыков, 2004; Копылова и др., 1998; Кравченко, 2004; Кугаенко и др., 2009; Салтыков, Кравченко, 2009; Соболев, 1999; Соболев, Тюпкин, 1996, 1998; Соболев и др., 1996; Sobolev, 2001]</p>
<p><i>dS</i> – вариация площади сейсмогенных разрывов. Методика ориентирована на выявление форшоковой активизации и является дополнением к методике <i>RTL</i>. Вычисляется разница <i>dS</i> между накопленной площадью сейсмогенных разрывов в пределах круговой области радиусом $R_{\max} = 50$ км за последний год ($T_{\max} = 1$ год) и среднемноголетним значением (T_{\max} – длина каталога). Области повышенных значений <i>dS</i> соответствуют зонам форшоковой активизации. Пример: рис. 6.</p>	<p>[Завьялов, 2005; Соболев, Пономарев, 2003; Соболев, Тюпкин, 1996; Соболев и др., 1996]</p>	<p>[Землетрясения России, 2009–2011; Соболев, 1999; Соболев, Тюпкин, 1998; Салтыков, Кравченко, 2009, 2010]</p>
<p>Выявление кластеров землетрясений. Кластер – цепочка землетрясений, в которой пространственно-временное взаиморасположение событий ограничено и энергия каждого последующего землетрясения не меньше энергии предыдущего. Методика ориентирована на выявление форшоковой активизации и является дополнением к методике <i>RTL</i>: возникновение кластеров, согласно [Соболев, Тюпкин, 1998], соответствует третьей стадии подготовки сильного землетрясения [Соболев, 1999, 2011]. Пример: рис. 7.</p>	<p>[Соболев, Пономарев, 2003]</p>	<p>[Землетрясения России, 2009–2011; Соболев, 1999, 2008; Салтыков, Кравченко, 2009, 2010, 2011]</p>

Таблица 1. (Окончание)

Методика. Краткое описание	Публикации результатов успешного применения методики в различных регионах мира	Публикации результатов применения методики на Камчатке
<p><i>Z</i> – функция Методика ориентирована на выделение областей сейсмического затишья в пространстве и времени [Wyss, Habermann, 1988]. Она состоит в идентификации значимых изменений интенсивности потока сейсмических событий выбранного энергетического диапазона. В основу анализа заложена функция <i>Z</i>-тест, относящаяся к статистическим средствам проверки гипотез. В случае исследования вариаций сейсмического режима применяется <i>Z</i>-тест для средних с известными дисперсиями для проверки гипотезы о различии между средними двух генеральных совокупностей. При этом рассматриваются скорости потока землетрясений в ограниченном объеме для двух последовательных интервалов времени и выявляется их значимое различие. Количественно затишье характеризуется значениями <i>Z</i> (статистическая значимость), <i>SRD</i> (уменьшение скорости сейсмического потока) и длительностью затишья <i>dT</i>. Аномалии (сейсмическому затишью) отвечает статистическая значимость $Z > 3$, что соответствует не менее чем 99% надежности выделения аномалии. Пример: рис. 8.</p>	<p>[Тихонов, 2005; Katsumata, 2011; Katsumata, Kasahara, 1999; Kisslinger, 1988; Kisslinger, Kindel, 1994; Murru et al., 1999; Polat et al., 2008; Toda, Matsumura, 2006; Tsukakoshi, Shimazaki, 2006; Wiemer, Wyss, 1994; Wu, Chiao, 2006; Wyss, Habermann, 1988; Wyss, Martyrosian, 1998; Wyss, Wiemer, 1999; Wyss et al., 1995, 1996, 1997, 1999, 2004]</p>	<p>[Гордеев и др., 2006б, Землетрясения России, 2009–2011; Кравченко, 2005; Кугаенко и др., 2009; Салтыков и др., 1998; Салтыков, Кугаенко, 2000; Салтыков, Кравченко, 2009, 2011; Соболев, Тюпкин, 1996]</p>
<p><i>Активность A10</i> Активность A_{10} рассчитывается из числа землетрясений N и наклона графика повторяемости γ и приводится к площади $S = 10^3$ км² и временному интервалу 1 год</p>	<p>[Ризниченко, 1985]</p>	<p>[Землетрясения России, 2009–2011; Салтыков, Кравченко, 2009, 2010; Федотов, 2005]</p>

ков, 2010]. На рис. 4 представлены карты величины Z_γ с 1983 по 2000 гг., где показаны расчетные аномалии перед сильными камчатскими землетрясениями 90-х годов XX века. Окружностями выделены области, землетрясения которых сформировали максимальные отклонения параметра γ от фоновых значений. Пространственное сканирование проводилось цилиндрическими объемами с радиусом $R \leq 100$ км для площади 51° – 57° с.ш. и 156° – 167° в.д. Временной шаг равен 1 году, за шаг сканирования сейсмоактивной области Камчатки приняты $\Delta\phi = 0.125^\circ$ с.ш. и $\Delta\lambda = 0.25^\circ$ в.д. Глубина используемых землетрясений ограничена 100 км. Радиус R – переменный, так как фиксированным является число используемых землетрясений N .

Следует отметить, что аномалии занимают большую часть этих областей, а значения параметра Z_γ достигают -5 , что свидетельствует об интенсивности проявления этой особенности в сейсмическом режиме. Перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г. с $M_w = 7.8$ наблюдалась зона аномально низких значений наклона графика повторяемости на протяжении более 10 лет. Аномалия пространственно расположена в пределах очаговой области землетрясения, а ее размер сопоставим с очагом. Также на рис. 4 представлены аномалии, которые соответствуют землетрясени-

ям 17.08.1983 г. с $M_w = 7.0$, 21.06.1996 с $M_w = 6.7$, 08.03.1999 с $M_w = 6.9$. Перед землетрясением 01.06.1998 с $M_w = 6.5$ и сильнейшим коровым сейсмическим событием Камчатки за годы детальных наблюдений – Карымским землетрясением 01.01.1996 с $M_s = 7.0$ – аномалий в сейсмическом режиме по данной методике не выявлено. Данная методика довольно инерционна, поэтому расчеты в целях мониторинга сейсмической активности достаточно проводить один раз в год. В случае снижения уровня надежной регистрации землетрясений оперативность метода может улучшиться.

На рис. 5 в качестве примера представлена аномалия параметра RTL перед землетрясением 21.06.1996 г. с $M_w = 6.7$. В 1999 г. алгоритм RTL был передан его авторами в Камчатский филиал Геофизической службы РАН для оперативного использования. Для проведения расчетов и визуализации результатов была разработана программа для работы с каталогами “ RTL -анализатор” [Иванов, Салтыков, 2004], адаптированная к авторской методике. Приведенные на рис. 5а, 5д карта значений RTL и график временного хода RTL в точке минимального значения параметра демонстрируют возможности “ RTL -анализатора” по выделению и наглядному представлению аномалии, облегчающие детальное изучение сейсмического

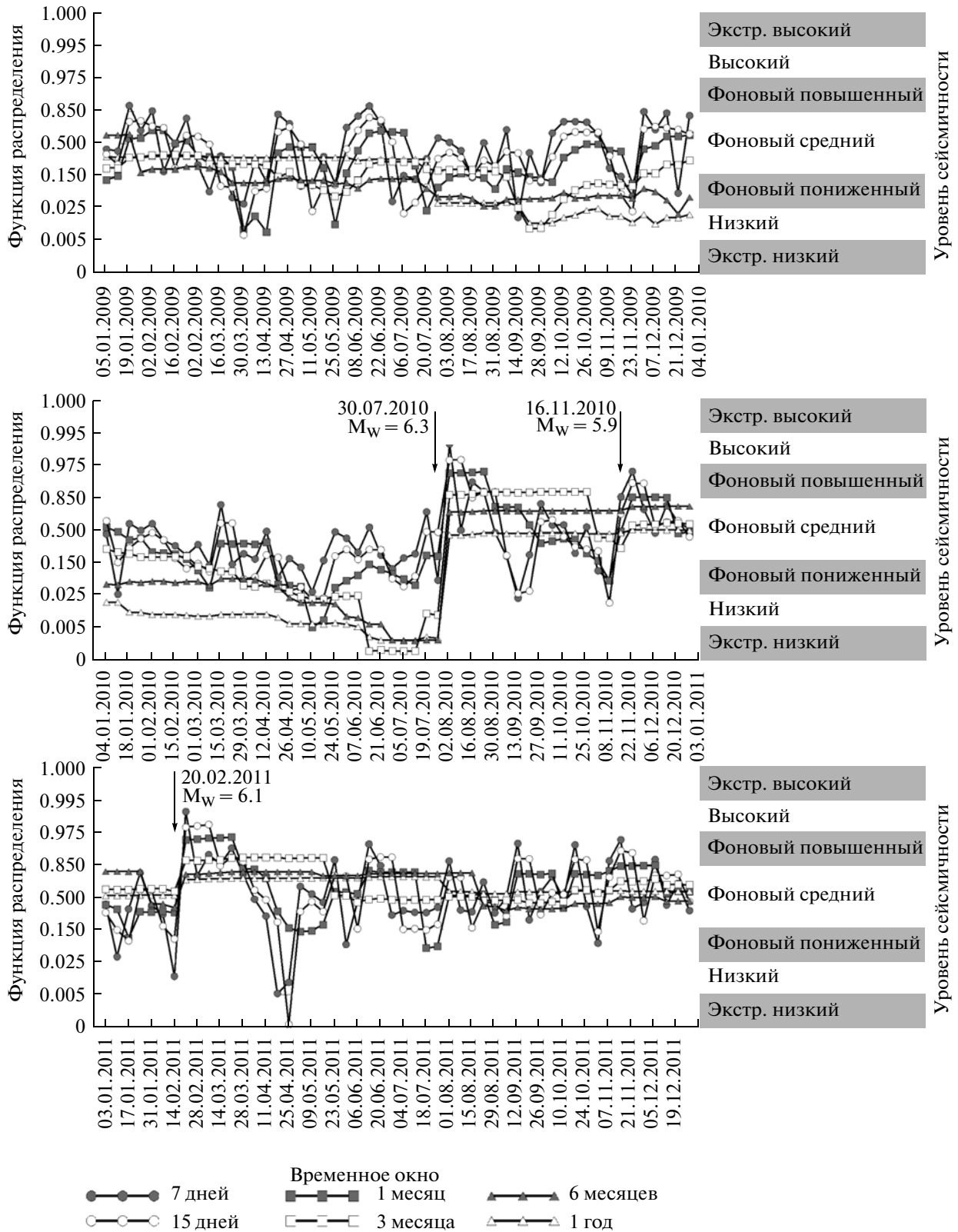


Рис. 3. Временной ход оценок уровня сейсмичности в различных временных окнах по шкале “СОУС’09” в 2009–2011 гг. Землетрясения 30.07.2010 г., 16.11.2010 г. и 20.02.2011 г. отмечены стрелками.

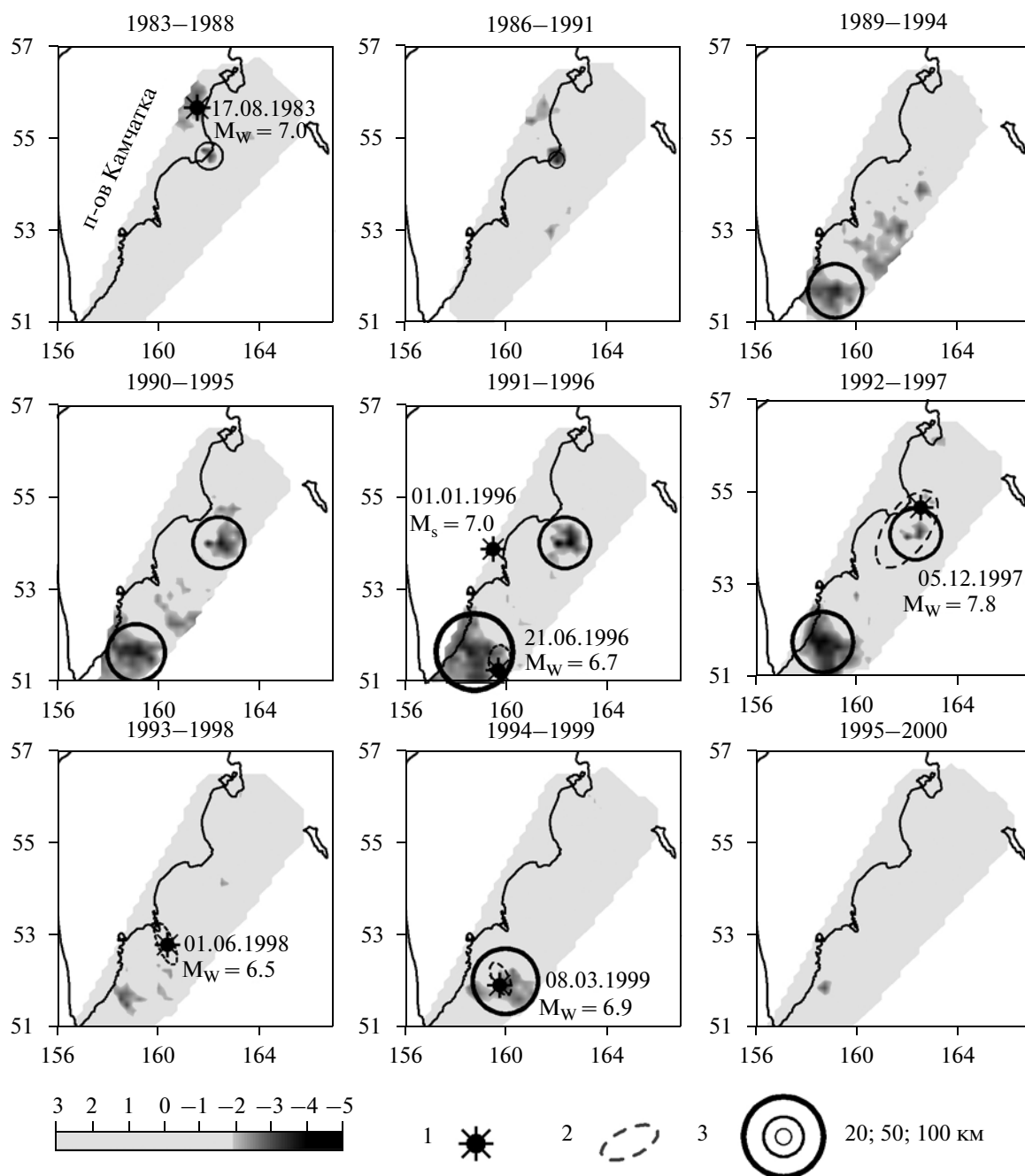


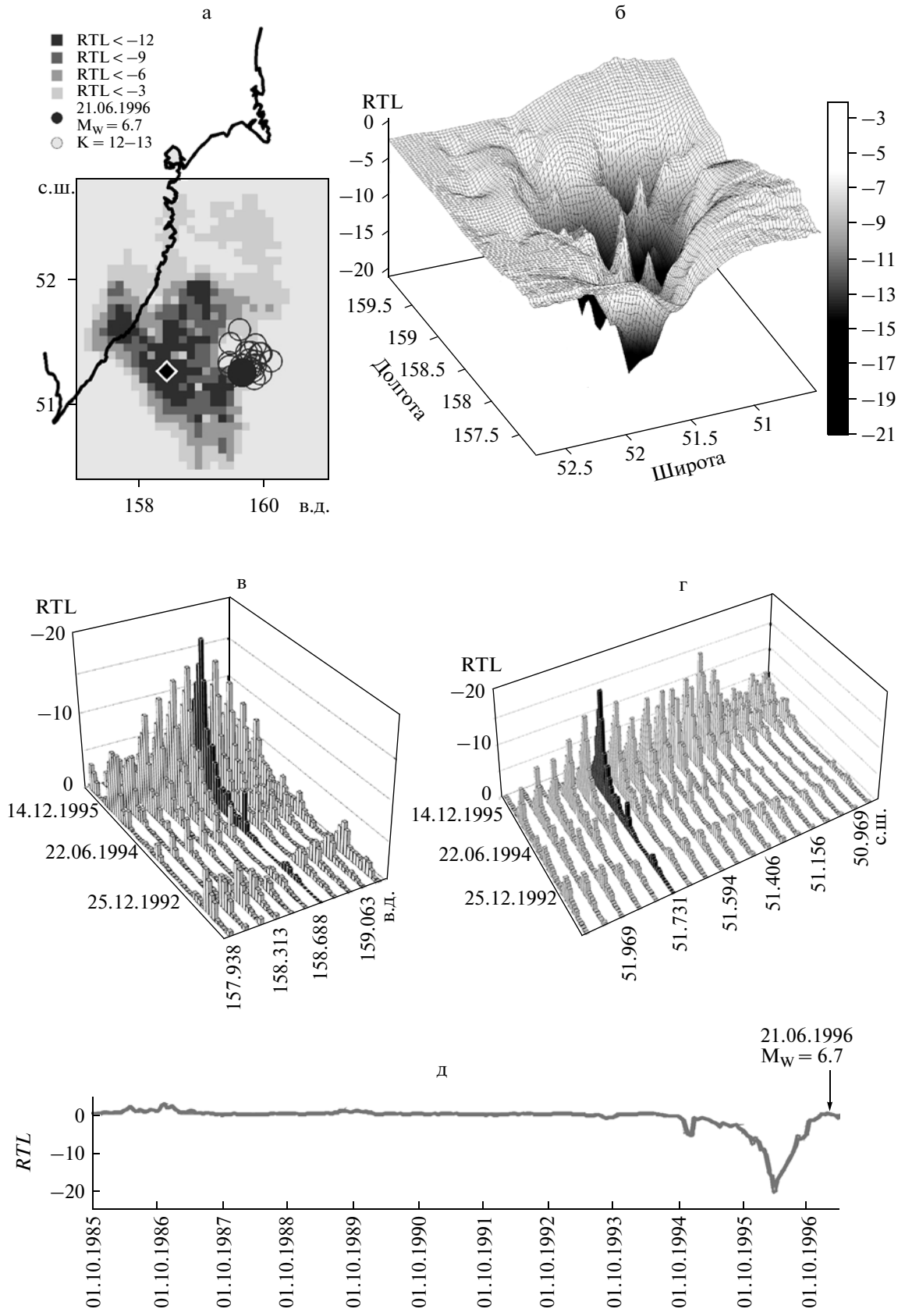
Рис.4. Карты параметра Z_γ , характеризующие области статистически значимого уменьшения наклона графика повторяемости, рассчитанные в скользящем временном окне шириной 6 лет при фиксированном числе используемых событий $N = 200$. Фоновые значения γ рассчитывались за 12 предыдущих лет. Цветовой шкале соответствуют значения Z_γ , характеризующие статистическую значимость аномалии.

1 – эпицентры землетрясений; 2 – области их афтершоковых последовательностей; 3 – территории, землетрясения которых сформировали максимальные отклонения параметра γ от фоновых значений.

процесса. Согласно рис. 5, сейсмическое затишье перед рассматриваемым сильным землетрясением продолжалось более года, минимального значения параметр RTL достигал в июне 1995 г. Землетрясение 21.06.1996 г. с $M_W = 6.7$ произошло на краю аномалии спустя полгода после окончания зати-

шья. Момент землетрясения отмечен стрелкой на графике (см. рис. 5д).

В программу “ RTL -анализатор” также входит функция анализа площадей сейсмогенных разрывов, которая является дополнением к RTL -методике и служит для выявления форшоковой акти-



визации, следующей за сейсмическим затишьем. На рис. 6 приведена карта вариаций площадей сейсмогенных разрывов dS перед рассмотренным выше землетрясением 21.06.1996 г. В данном случае расчеты ведутся для полного (неочищенного от афтершоков) каталога. Перед землетрясением 21.06.1996 г. активизация (увеличение площади сейсмогенных разрывов по сравнению со средне-многолетним значением) проявилась после окончания сейсмического затишья по параметру RTL . Область повышенной сейсмической активности, выявленная по параметру dS , пространственно примыкают к RTL -аномалии. Землетрясение 21.06.1996 г. с $M_w = 6.7$ произошло на краю аномалии dS спустя 3 месяца после ее появления.

Кластером [Соболев, Пономарев, 2003; Соболев, Тюпкин, 1998] считается появление двух или более землетрясений, если расстояние между их гипоцентрами меньше критического $R_{cr} = 3l_i + \varepsilon$, где l_i – размер сейсмогенного разрыва в км, ε – поправка на неточность определения эпицентров, принятая равной 10 км, и время между этими событиями меньше $T_{cr} = 0.01 \times 10^{0.4(K_i - 8.5)}$ (годы). Для длины сейсмогенного разрыва принимаем соотношение $\lg l_i = 0.244 \times K_i - 2.266$ [Ризниченко, 1985]. К кластерам относились только те группы, в которых предыдущее землетрясение было не больше последующего. На рис. 7 представлено положение главных событий кластеров, выявленных на Камчатке в течение 1 года перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г. с $M_w = 7.8$. Примечательно, что положение этих кластеров соответствует аномалиям параметра dS перед Кроноцким землетрясением по [Соболев, Пономарев, 2003].

Еще одна известная методика, ориентированная на выделение сейсмического затишья и используемая при мониторинге параметров сейсмичности Камчатки, была предложена в работе [Wyss, Habermann, 1988] и опирается на статистическую функцию Z -тест. Этот подход быстро стал популярен и широко используется для различных регионов мира, (см. списки публикаций из табл. 1). Начальное название методики “ Z -test” со временем модифицировалось в “ Z -mapping”, “ Z -value”, “ Z -функцию”. На Камчатке работы по

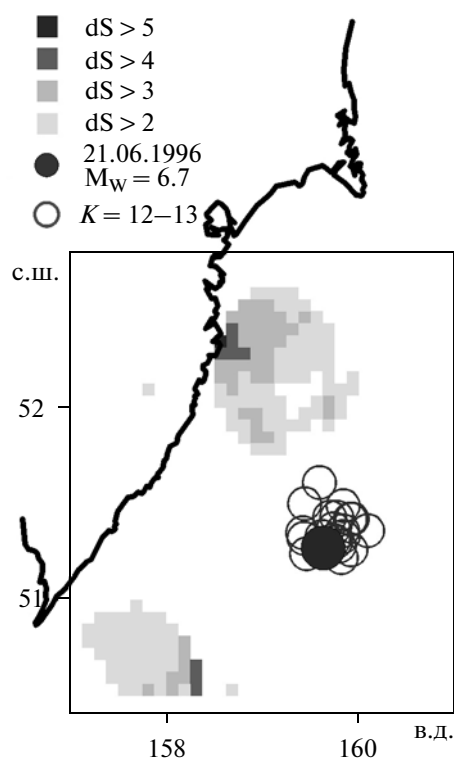


Рис. 6. Карта вариаций площадей сейсмогенных разрывов перед землетрясением 21.06.1996 г. с $M_w = 6.7$ (расчетная дата – 23.03.1996 г.). Градация цвета от светлого к темному соответствует увеличению площадей сейсмогенных разрывов. На карту нанесен эпицентр землетрясения 21.06.1996 и его сильнейшие афтершоки с $K = 12-13$.

этой методике начаты в 1996 г. Мы используем термин “ Z -функция” или “ Z ”. Дополнительно для выявленных на основе процедуры Z -тест точек статистически значимого уменьшения уровня сейсмичности вычисляется величина уменьшения скорости сейсмического потока $SRD(t) = 1 - R_2/R_1$ (R_1, R_2 – средние величины скорости потока землетрясений в сравниваемых временных интервалах). Определяется наибольшее значение $SRD = \max(SRD(t))$ и соответствующее ему время T . Абсолютному сейсмическому затишью соответствует $SRD = 1$, уменьшению уровня сейсмичности в 8 раз – $SRD = 0.875$, уменьшению в 4 раза – $SRD = 0.75$, уменьшению в 2 раза – $SRD = 0.5$. Расчетные точки с одинаковы-

Рис. 5. RTL -аномалия (сейсмическое затишье) перед землетрясением 21.06.1996 г. с $M_w = 6.7$:

а – карта значений RTL на момент достижения аномалией своего минимума. Градация цвета от светлого к темному соответствует уменьшению параметра RTL (увеличению глубины аномалии). Ромбом обозначена точка минимального значения RTL . На карту нанесен эпицентр землетрясения 21.06.1996 и его сильнейшие афтершоки с $K = 12-13$; б – аномалия RTL в 3-D представлении; в, г – пространственно-временное представление развития аномалии вдоль линий долготы и широты, проходящих через точку минимального значения RTL (январь 1992 г.–июнь 1996 г.). Темным цветом выделены столбчатые диаграммы, соответствующие точке минимального значения RTL ; д – график временного хода RTL в точке минимального значения параметра (январь 1985 г.–июнь 1996 г.). Землетрясение 21.06.1996 г. отмечено стрелкой.

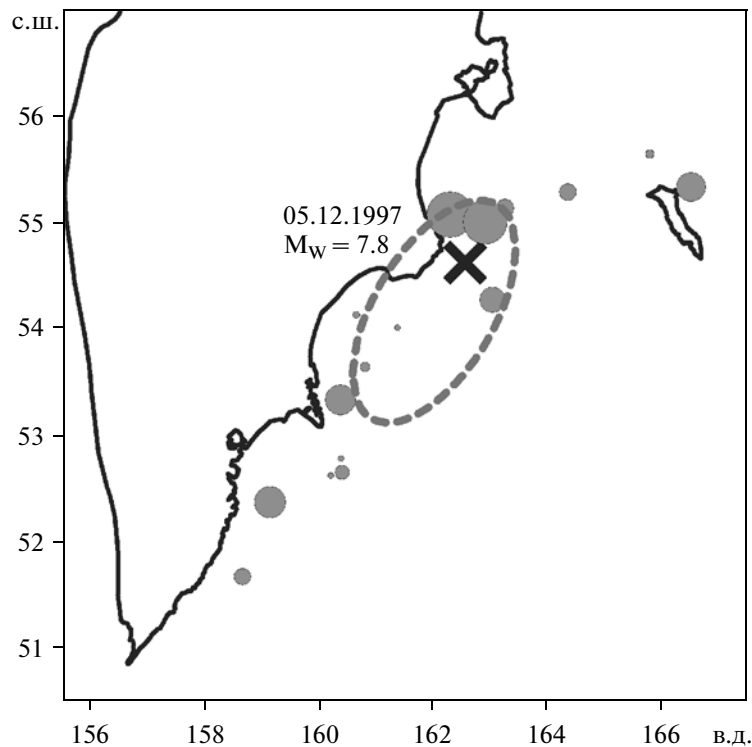


Рис. 7. Эпицентры главных событий кластеров землетрясений с энергетическим классом $K \geq 9.5$ в течение 1 года до Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. $M_w = 7.8$. Отмечены инструментальный эпицентр (X) и очаг Кроноцкого землетрясения (пунктирная линия).

ми значениями SRD объединяются по принципу пространственно-временного соседства и определяют область сейсмического затишья. Выделение сейсмического затишья по методике “ Z -функция” проиллюстрировано на рис. 8. на примере ситуации перед землетрясением 02.03.1993 г. с $M_w = 6.8$. Пунктиром отмечена область сейсмического затишья, в которой в течение двух лет, с ноября 1989 г. по октябрь 1991 г., наблюдалось уменьшение скорости сейсмического потока в 8 раз. Землетрясение 02.03.1993 г. произошло на краю аномальной зоны.

20.02.2011 г. в Камчатском заливе (55.7° с.ш., 162.5° в.д.) на глубине 47 км произошло землетрясение с магнитудой $M_w = 6.1$ ($K = 13.8$). Землетрясению предшествовало появление ряда аномалий в сейсмическом режиме, имеющих предвестниковый характер [Салтыков, Кравченко, 2011]. В частности, в территориальной близости от эпицентра землетрясения были выявлены сейсмические затишья по двум независимым методикам (Z и RTL , рис. 9) и группа кластеров. Кроме того, перед землетрясением было отмечено снижение регионального уровня сейсмичности по шкале “СОУС-09” [Салтыков, 2011]. RTL -аномалия проявилась в 2008 г., минимальных значений пара-

метр RTL достигал осенью 2009 г., длительность затишья составляет 1.5–2 года. Землетрясение 20.02.2011 г. произошло в пределах области RTL -аномалии спустя 10 месяцев после выхода параметра RTL на фоновый уровень. Уменьшение скорости сейсмического потока в 8 раз (Z -аномалия) наблюдалось в течение 15 месяцев – с октября 2009 г. по декабрь 2010 г. Землетрясение 20.02.2011 г. произошло на границе области Z -аномалии спустя 2 месяца после его окончания. Аномалии в параметрах сейсмичности были выявлены в оперативном режиме (т.е. до землетрясения).

Количественные оценки эффективности и надежности выявления сейсмических затиший

По результатам ретроспективного выделения сейсмических затиший по методикам RTL и “ Z -функция” проведены оценки эффективности и надежности выявления предвестника. Рассматривался период наблюдений с 1980 по 2011 г.

Эффективность предвестника – отношение числа сейсмических затиший, предвещающих согласно модели сильное землетрясение, к числу выделенных аномалий.

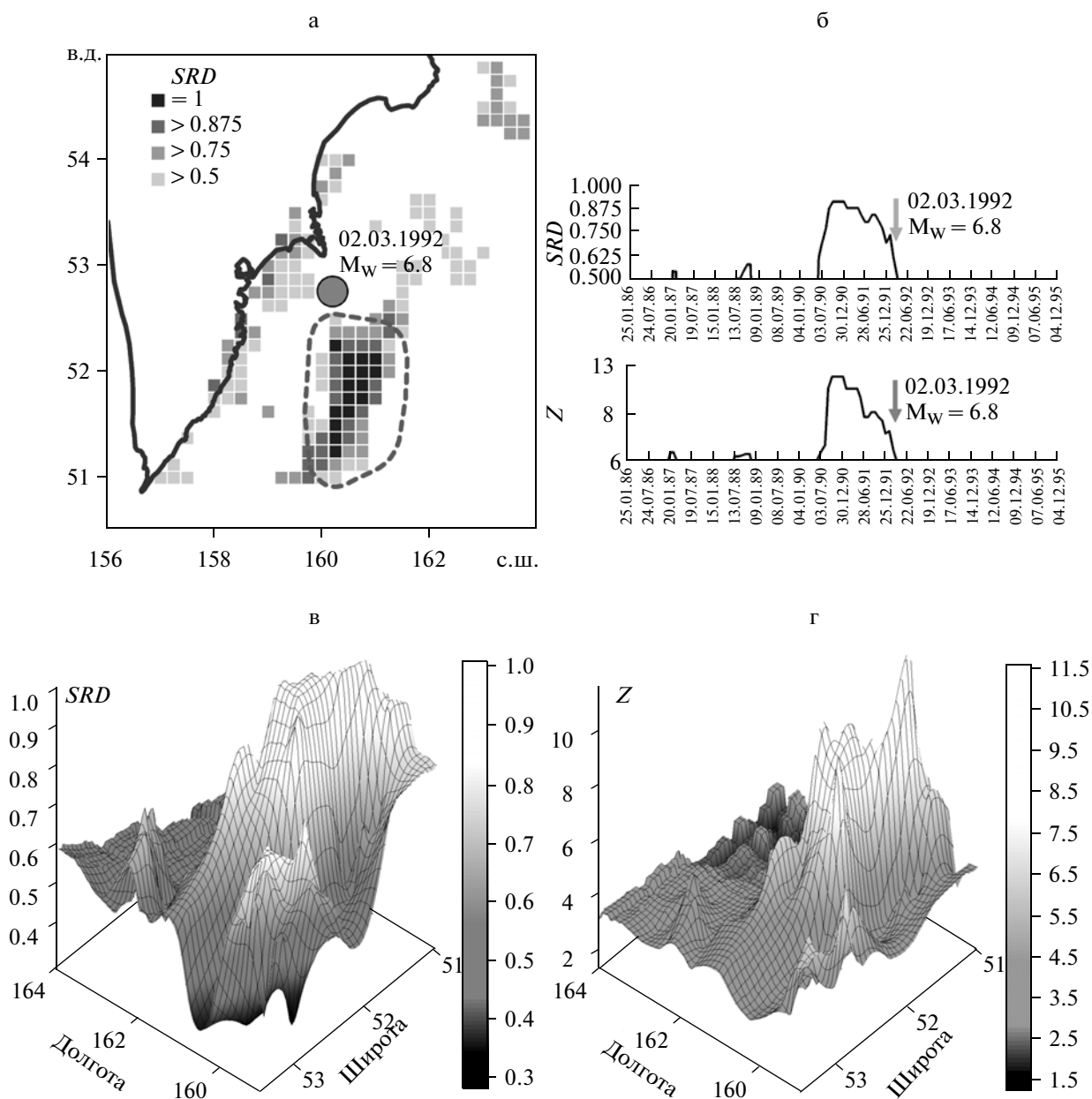


Рис. 8. Сейсмическое затишье перед землетрясением 02.03.1992 г. с $M_w = 6.8$, выделенное по методике “*Z*-функция”: а – карта максимальных значений уменьшения скорости сейсмического потока *SRD* (расчетная дата – 30.11.1990 г.). Пунктиром выделена область уменьшения скорости сейсмического потока в 8 раз. б – графики временного хода параметров *SRD* и *Z* для области уменьшения скорости сейсмического потока в 8 раз. Землетрясение 02.03.1993 г. отмечено стрелкой; в, г – 3-D представление *Z*- и *SRD*-аномалий (расчетная дата – 30.11.1990 г.).

С 1980 по 2011 гг. в зоне мониторинга (см. рис. 1), наиболее сейсмоактивной области Камчатки, по методике “*Z*-функция” выявлено 25 аномалий, соответствующих сейсмическому затишью. Пятнадцати аномалиям сопоставлены землетрясения с $M \geq 6.0$, пяти из них – землетрясения с $M \geq 6.8$. Эффективность предвестника по

методике “*Z*-функция” составила 0.6 (15 из 25) для землетрясений с $M \geq 6.0$ и 0.2 (5 из 25) для землетрясений с $M \geq 6.8$.

По *RTL*-методике за тот же интервал времени выделено 19 аномалий, соответствующих сейсмическому затишью. Двенадцати из них могут быть сопоставлены землетрясения с $M \geq 6.0$, пяти из

Таблица 2. Характеристика аномалий сейсмического режима, предвещающих сильные землетрясения Камчатки 2004–2011 гг., выявленных в режиме реального времени

Землетрясение	Метод	Область ожидаемого землетрясения. Формулировка прогноза	Упрежде- ние	Комментарии
14.04.2004 г. $M_W = 6.2$ $\varphi = 55.16^\circ$ с.ш., $\lambda = 162.97^\circ$ в.д. $h = 38$ км	<i>RTL</i>	Камчатский залив, координаты: $54.0\text{--}56.5^\circ$ с.ш., $160\text{--}163.5^\circ$ в.д.	*18 мес. **6 мес.	Минимум <i>RTL</i> ($RTL = -18$) был отмечен в феврале 2003 г., длительность аномалии – 18 месяцев. Землетрясение произошло в пределах аномальной области спустя полгода после выхода параметра <i>RTL</i> на фоновый уровень (октябрь 2003 г.). Предвестниковая аномалия выделена в режиме реального времени ¹
10.03.2007 г. $M_W = 5.8$ $\varphi = 55.1^\circ$ с.ш., $\lambda = 162.33^\circ$ в.д. $h = 40$ км	<i>RTL</i>	Камчатский залив, восточная акватория Кроноцкого п-ва и Кроноцкого залива, координаты: $52.5\text{--}56^\circ$ с.ш., $161.5\text{--}165.5^\circ$ в.д.	*10 мес.	Минимум <i>RTL</i> ($RTL = -19$) отмечен в апреле 2006 г., длительность аномалии – 20 месяцев. Землетрясение произошло на краю аномальной области за 2 месяца до выхода параметра <i>RTL</i> на фоновый уровень (май 2007 г.) Предвестниковая аномалия выделена в режиме реального времени ² .
30.05.2007 г. $M_W = 6.4$ $\varphi = 51.89^\circ$ с.ш., $\lambda = 157.90^\circ$ в.д. $h = 128$ км	<i>Z</i>	Прогноз в КФ РЭС от 19.01.2007 о возможности землетрясения с $M \geq 6.0$ в течение 2007 г. в широтной полосе $51.0^\circ\text{--}54.5^\circ$ с.ш. [Чебров и др., 2011]	***2 мес.	Аномалия характеризуется уменьшением скорости сейсмического потока в течение 21 месяца (июль 2005 г. – март 2007 г.) в 8 раз по сравнению с фоновым значением. Предвестник выделен в режиме реального времени. Успешный прогноз по данным КФ РЭС [Чебров и др., 2011].
24.07.2008 г. $M_W = 6.2$ $\varphi = 50.8^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.3^\circ$ в.д. $h = 36$ км	<i>RTL</i>	Южная часть Камчатки, от Авачинского залива до мыса Лопатка координаты: $50.5\text{--}52.5^\circ$ с.ш., $157^\circ\text{--}161^\circ$ в.д.	*12 мес.	Минимум <i>RTL</i> ($RTL = -15$) отмечен в июле 2007 г., длительность аномалии – около года. Землетрясение произошло на краю аномальной области при выходе параметра <i>RTL</i> на фоновый уровень.
	<i>Z</i>	Прогноз в КФ РЭС от 25.01.2008 и от 29.05.2008 о возможности землетрясения с $M \geq 6.0 \pm 0.5$ в течение 2008 г. в широтной полосе $51.0^\circ\text{--}55.0^\circ$ с.ш. [Чебров и др., 2011]	***14 мес.	Отмечено уменьшение скорости сейсмического потока в 15 раз ($SRD = 0.94$) в течение 13 месяцев. Землетрясение произошло на расстоянии 20 км от аномалии. Предвестник выделен в режиме реального времени. Успешный прогноз по данным КФ РЭС [Чебров и др., 2011].

Таблица 2. (Окончание)

Землетрясение	Метод	Область ожидаемого землетрясения. Формулировка прогноза	Упрежде- ние	Комментарии
30.07.2010 г. $M_W = 6.3$ $\varphi = 52.23^\circ$ с.ш., $\lambda = 160.46^\circ$ в.д. $h = 38$ км	<i>RTL</i>	Южная часть Камчатки, от Авачинского залива до мыса Лопатка координаты: $50.5-52.5^\circ$ с.ш., $157-161^\circ$ в.д.	*36 мес. **24 мес	Минимум <i>RTL</i> ($RTL = -15$) отмечен в июле 2007 г., длительность аномалии – около года. Землетрясение произошло на краю аномальной области спустя 2 года после выхода параметра <i>RTL</i> на фоновый уровень (июль 2008 г).
	<i>Z</i>	Прогноз в КФ РЭС от 28.06.2010 землетрясения $M \geq 6.0$ (юг Авачинского залива и юг Камчатки).		Эпицентр землетрясения 30.07.2010 г. приходится на область аномальных значений <i>SRD</i> , тем не менее статистически эта аномалия незначима. По данным КФ РЭС предвестник выявлен в режиме реального времени. Прогноз оправдался по времени и магнитуде, но имеет ошибку по местоположению ³ .
20.02.2011 г. $M_W = 6.1$ $\varphi = 55.73^\circ$ с.ш., $\lambda = 162.48^\circ$ в.д. $h = 47$ км	<i>RTL</i>	Прогноз в КФ РЭС от 03.12.2010 о возможности землетрясения $M \geq 7.0$ в ближайшие полгода на юге Камчатки (включая юг Авачинского з-ва) и в Камчатском заливе Ошибка по энергии	*15 мес. **10 мес	Минимум <i>RTL</i> ($RTL = -21$) отмечен в ноябре 2009 г., длительность аномалии – 1.5 года. Землетрясение произошло на краю аномальной области спустя 10 месяцев после выхода параметра <i>RTL</i> на фоновый уровень (апрель 2010 г) [Салтыков, Кравченко, 2011]. По данным КФ РЭС предвестник выявлен в режиме реального времени. Прогноз оправдался по времени и местоположению, но имеет ошибку по энергии ⁴ .
	<i>Z</i>	Прогноз в КФ РЭС от 03.12.2010 землетрясения $M \geq 6$ в районе с координатами $53.5-57.5$ с.ш., $159-164.5$ в.д. Камчатский залив, район Кроноцкого п-ва и северной части Кроноцкого залива	***2 мес.	Землетрясение произошло на краю области, в которой было выделено уменьшение скорости сейсмического потока в 8 раз с сентября 2009 г. по декабрь 2010 г. Предвестник выделен в режиме реального времени. Успешный прогноз по данным КФ РЭС ⁴ .
18.05.2011 г. $M_W = 5.5$ $\varphi = 55.39^\circ$ с.ш., $\lambda = 164.03^\circ$ в.д. $h = 69$ км	<i>COYCO9</i>	Прогноз в КФ РЭС от 12.05.2011 г.: В связи с тем, что в настоящее время наблюдается тенденция к уменьшению выделяющейся сейсмической энергии в целом по региону, в течение 1–2 недель на Камчатке (район $50.5-56.5^\circ N$, $156-167^\circ E$) возможно землетрясение с магнитудой более 6.0. ⁴		По данным КФ РЭС предвестник выявлен в режиме реального времени. Прогноз оправдался по времени и местоположению, но имеет ошибку по энергии ⁴ .

Примечание: * – интервал времени, отсчитываемый от начала выхода параметра *RTL* из минимума до момента землетрясения; ** – интервал времени, отсчитываемый от выхода параметра *RTL* на фоновый уровень до момента землетрясения; *** – интервал времени между окончанием затишья, определяемого по методике *Z*, и землетрясением.

¹ Чебров В.Н., Абубакиров И.Р., Бахтияров В.Ф. о др. Научно-технический отчет “Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.2003–31.12.2003)” г. Петропавловск-Камчатский. Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН. 2004 г.

² Отчет о научно-исследовательской работе “Комплексный сейсмический и геофизический мониторинг геодинамических процессов в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг”. Руководитель: В.Н. Чебров. Фонды Центра информационных технологий и систем органов исполнительной власти (ЦИТиС). Инв. № 02200950632. 2009 г.

³ Отчет о научно-исследовательской работе “Комплексный мониторинг геодинамических процессов в Камчатском крае”. Руководитель: В.Н. Чебров. Фонды Центра информационных технологий и систем органов исполнительной власти (ЦИТиС). Инв. № 02201257401. 2012 г.

⁴ Чебров В.Н., Абубакиров И.Р., Воропаева Н.П. о др. Технический отчет о состоянии системы сейсмического мониторинга Камчатского филиала Геофизической службы РАН в 2011 г. г. Петропавловск-Камчатский. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, Камчатский филиал. 2012 г.

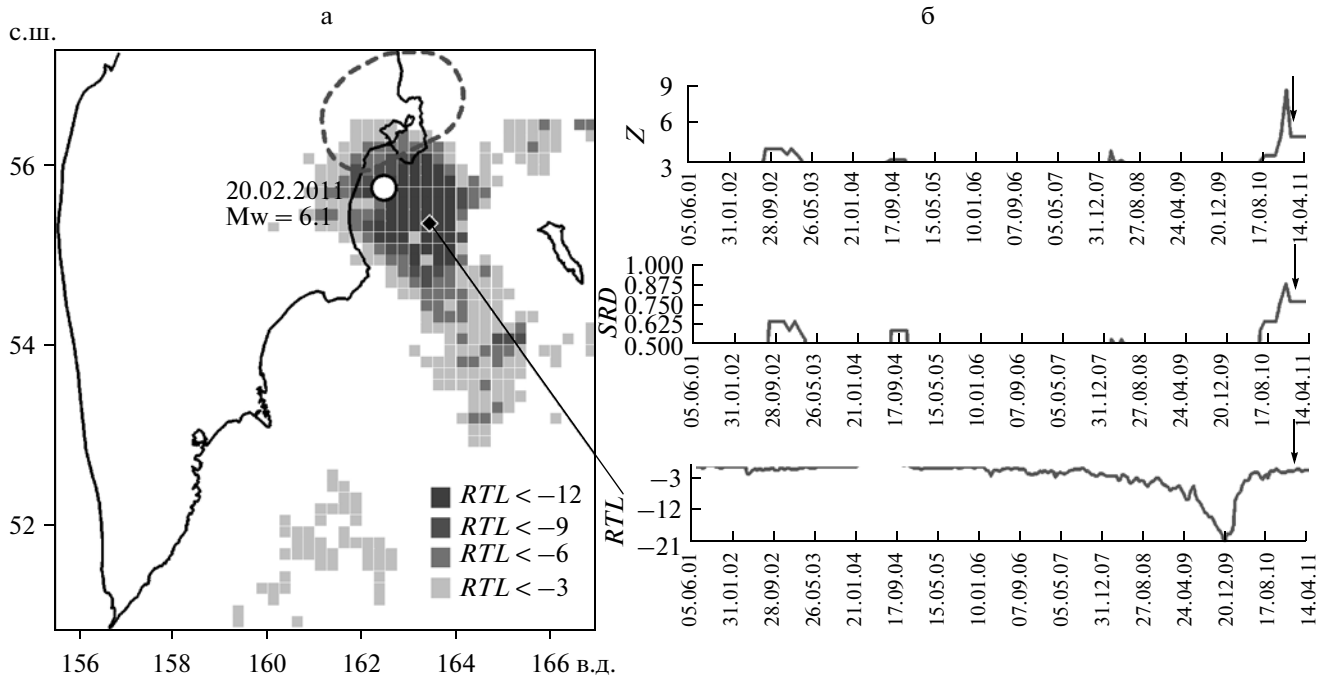


Рис. 9. Сейсмическое затишье, оперативно выявленное перед землетрясением 20.02.2011 г. с $M_W = 6.1$. по методикам *RTL* и *Z*-функция:

а – карта значений *RTL* на момент достижения аномалией своего минимума. Область уменьшения скорости сейсмического потока в 8 раз (*Z*-аномалия) околнута пунктиром. Отмечены эпицентр землетрясения 20.02.2011 г. (кружок) и точка минимального значения *RTL* (ромб); б – графики временного хода параметров *Z*, *SRD* и *RTL* в 2001–2011 гг. Землетрясение 20.02.2011 г. отмечено стрелкой.

этих аномалий – землетрясения с $M \geq 6.8$. Эффективность прогностического параметра *RTL* составила 0.63 (12 из 19) для землетрясений с $M \geq 6.0$ и 0.26 (5 из 19) для землетрясений с $M \geq 6.8$.

Надежность предвестника – отношение числа землетрясений, для которых было выделено предшествующее сейсмическое затишье, к числу всех землетрясений с магнитудой не менее заданной.

С 1980 по 2011 гг. в зоне мониторинга на глубинах до 100 км произошло 32 землетрясения с магнитудой $M \geq 6$, из них 10 – с магнитудой $M \geq 6.8$. Сейсмические затишья с использованием методики “*Z*-функция” были выделены перед 17 землетрясениями с $M \geq 6.0$, из них 6 землетрясений имели магнитуду $M \geq 6.8$. Землетрясение происходило в окрестности зоны уменьшения сейсмической скорости в 8 и более раз ($SRD \geq 0.875$) в интервале времени до трех лет после стадии затишья. Надежность предвестника по методике “*Z*-функция” составила 0.53 (17 из 32) для землетрясений с $M \geq 6.0$ и 0.6 (6 из 10) для землетрясений с $M \geq 6.8$.

Сейсмические затишья по методике *RTL* выделены за тот же интервал времени перед 17 землетрясениями с $M \geq 6.0$, из них 8 землетрясений имели магнитуду $M \geq 6.8$. Землетрясение происходило, как правило, на краю аномалии в течение

двух лет после выхода параметра *RTL* на фоновый уровень. Надежность прогностического параметра *RTL* составила 0.53 (17 из 32) для землетрясений с $M \geq 6.0$ и 0.8 (8 из 10) для землетрясений с $M \geq 6.8$.

Оперативное выявления предвестниковых аномалий сейсмического режима

Заключения о сейсмической обстановке, составленные по результатам анализа динамики сейсмического процесса, передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) [Гордеев и др., 2006б; Чебров и др., 2011]. Оценки уровня текущей сейсмической активности по шкале “СОУС-09” [Салтыков, 2011] в различных временных окнах (от 7 дней до 1 года) проводятся еженедельно. Результаты расчетов других рассмотренных параметров сейсмического режима оформляются в виде официальных заключений ежеквартально. Имеются случаи успешной реализации прогнозов о возможности землетрясения.

В таблице 2 обобщены примеры своевременного выявления предвестников перед сильными камчатскими землетрясениями, в основном, по

методикам *RTL* и *Z*. Результаты этих работ отражены в материалах КФ РЭС, публикациях и научных отчетах. В таблице 2 представлены формулировки прогнозов, приведено время упреждения, даны ссылки на документы, в которых отражен факт оперативного обнаружения предвестника или подачи прогнозного заключения.

В заключении к этому разделу хотелось бы остановиться на особенностях текущего поведения параметров динамики сейсмичности Камчатки. На основе региональных каталогов камчатских землетрясений получены следующие результаты (по состоянию на начало 2012 г.):

- на севере Камчатки (в Камчатском заливе) завершилась аномалия *RTL*, завершилась *Z*-аномалия, наблюдаются повышенные значения активности A_{10} , отмечена группа кластеров;

- в районе Кроноцкого полуострова и Кроноцкого залива завершается *Z*-аномалия, наблюдаются повышенные значения активности A_{10} ;

- в районе Авачинского залива наблюдается абсолютное сейсмическое затишье (*Z*-аномалия), наблюдаются повышенные значения активности A_{10} , отмечена группа кластеров с наибольшими по энергии главными событиями;

- на юге Камчатки наблюдаются повышенные значения активности A_{10} и увеличенные значения наклона графика повторяемости γ . Примечательно, что ранее в этой области наблюдалось статистически значимое уменьшение γ .

Наиболее яркими аномалиями в сейсмическом режиме Камчатки в 2009–2011 гг. следует считать абсолютный минимум суммарной сейсмической энергии землетрясений в 2009 г. за время детальных наблюдений (1962–2011 гг.), региональное изменение (увеличение) наклона графика повторяемости землетрясений и смену знака аномалии γ на юге Камчатки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время на Камчатке успешно совмещается решение широкого круга проблем, связанных с исследованиями сейсмичности: от организации наблюдений до оперативного отслеживания параметров динамики сейсмического процесса.

Обеспечена регулярная оценка сейсмической обстановки по комплексу методик на основе регионального каталога, получаемого Камчатским филиалом Геофизической службы РАН. Комплекс методик включает:

- оценку уровня сейсмичности региона по шкале “СОУС’09”;

- расчет вариаций наклона графика повторяемости и выявление статистически значимых аномалий с помощью *Z*-теста;

- расчет сейсмической активности A_{10} ;

- мониторинг параметра *RTL*;

- выявление сейсмических затиший по методике “*Z*-функция”: обнаружение с помощью *Z*-теста областей статистически значимого уменьшения скорости потока землетрясений;

- мониторинг параметра *dS*-вариации площади сейсмогенных разрывов;

- выявление кластеризации землетрясений.

Заключения о сейсмической обстановке передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений согласно установленному регламенту, что подразумевает еженедельную оценку уровня сейсмичности и ежеквартальные оценки по всем остальным методикам.

По результатам ретроспективного выделения сейсмических затиший (с 1980 по 2011 гг.) по методикам *RTL* и “*Z*-функция” получены оценки надежности выявления предвестника (отношения числа землетрясений, для которых было выделено предшествующее сейсмическое затишье, к числу всех землетрясений с магнитудой не менее заданной). Надежность прогностического параметра, оцененная количественно, принимается во внимание и является основой для разработки сценариев реагирования на прогнозные заключения. Надежность выделения сейсмического затишья по методике “*Z*-функция” в 1980–2011 гг. составила 0.53 (17 из 32) для землетрясений с $M \geq 6.0$ и 0.6 (6 из 10) для землетрясений с $M \geq 6.8$. Для прогностического параметра *RTL* за тот же интервал времени надежность составила 0.53 (17 из 32) для землетрясений с $M \geq 6.0$ и 0.8 (8 из 10) для землетрясений с $M \geq 6.8$.

С 2006 г. сводки анализа параметров сейсмичности Камчатки публикуются в ежегодниках “Землетрясения России”, выводя представление сейсмических данных на принципиально новый качественный уровень – уровень количественных оценок.

Разработанная для Камчатки методика расчета функции распределения и шкалы уровня сейсмичности “СОУС’09” получила распространение и применяется для оценки уровня сейсмической активности по регионам для всей территории России. Результаты также публикуются в ежегодниках “Землетрясения России”.

В ближайшей перспективе планируется внедрение оценки уровня сейсмичности по шкале

“СОУС’09” для вулканов Камчатки, на которых ведется сейсмический мониторинг, обеспечивающий детальные данные о слабых локальных сейсмических событиях, сопровождающих вулканическую деятельность. Первоочередными объектами анализа являются Северная и Авачинская группы вулканов.

Различные этапы разработки и внедрения методик анализа сейсмичности входили в

– федеральную целевую Программу “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года” (мероприятие 23 “Модернизация и развитие системы сейсмологических наблюдений, анализа сейсмической обстановки и прогноза землетрясений” и мероприятие 25 “Проведение комплекса первоочередных НИОКР, направленных на создание принципиально нового аппаратного, методического и программного обеспечения функционирования системы сейсмологических наблюдений и прогнозирования землетрясений”);

– программу № 16 Президиума РАН “Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы”, проект “Изучение в режиме реального времени тонкой структуры разномасштабных сейсмических процессов на территории России с целью создания параметрической основы для разработки и совершенствования методов прогноза землетрясений”.

Авторы благодарны члену-корреспонденту РАН Г.А. Соболеву за содействие при внедрении методик мониторинга сейсмичности в Камчатском филиале Геофизической службы РАН и к.ф.м.н. В.Б. Смирнову за предоставление программы выделения афтершоков сильных землетрясений. Особую признательность мы выражаем нашим коллегам О.Г. Волович и В.В. Иванову за создание программ, использованных в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др.* Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 3. С. 28–38.
- 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. 2006б. № 4. С. 3–206.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006в. № 3. С. 6–27.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Банк сейсмологических данных Камчатки // Открытое образование. 2008. № 4. С. 16–22.
- Завьялов А.Д.* Наклоны графика повторяемости как предвестник сильных землетрясений на Камчатке // Прогноз землетрясений. Вып. 5. Душанбе-Москва: Дониш, 1984. С. 173–184.
- Завьялов А.Д.* От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 6. С. 1000–1008.
- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализации. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Землетрясения России (2003–2009 гг.).* Ежегодники. Обнинск: ГС РАН, 2006–2011 гг.
- Землетрясения Северной Евразии (1992–2005 гг.).* Ежегодники. Обнинск: ГС РАН, 1992–2011.
- Землетрясения СССР (1964–1991 гг.).* Ежегодники. М.: Наука, 1967–1991.
- Иванов В.В., Салтыков В.А.* Система оценки сейсмической опасности “RTL-анализатор” // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 335–353.
- Коновалова А.А., Салтыков В.А.* Различия в наклонах графика повторяемости для независимых событий и афтершоковых последовательностей // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 74–81.
- Коновалова А.А., Салтыков В.А.* Мониторинг вариаций наклона графика повторяемости землетрясений: методика и примеры // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 235–238.
- Копылова Г.Н., Жалыева Ю.К., Латыпов Е.Р.* Вариации слабой сейсмичности в эпицентральных зонах сильных ($M \geq 6.8$) камчатских землетрясений (по результатам расчета параметра RTL) // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. С. 158–169.
- Кравченко Н.М.* Оценка надежности прогностического параметра RTL // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 228–242.
- Кравченко Н.М.* Оценка достоверности сейсмического затишья, выделенного с помощью Z-теста, как предвестника сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 59–66.
- Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Салтыков В.А.* Подготовка Карымского сейсмо-вулканического кризиса в параметрах разномасштабной сейсмичности // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 27–37.
- Левина В.И., Митюшкина С.В., Ландер А.В., Чеброва А.Ю.* Сейсмичность Камчатского региона за 50 лет детальных наблюдений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 43–47.
- Моги К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.

- Молчан Г.Н., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С. 19–50.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Комплексный анализ сейсмичности Камчатки 2005–2007 гг. на основе регионального каталога // Вулканология и сейсмология. 2009. № 4. С. 53–63.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Параметры сейсмичности Камчатки в 2008 г. // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 2. С. 186–196.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Аномалии в сейсмическом режиме Камчатки, предшествовавшие землетрясению 20 февраля 2011 г. ($M = 6.2$) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 248–251.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 57–65.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М. Сейсмические затишья и активизации, предшествовавшие Кронюкскому землетрясению // Кронюкское землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. С. 55–67.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 63–72.
- Соболев Г.А. Применение алгоритма RTL для анализа стадий подготовки сильных землетрясений Калифорнии // Физика Земли. 2003. № 3. С. 3–12.
- Соболев Г.А. О применимости прогностических алгоритмов RTL и оценки энергии к сейсмичности Сахалина // Вулканология и сейсмология. 2007. № 3. С. 64–78.
- Соболев Г.А. Сейсмологические особенности подготовки двух сильных землетрясений // Физика Земли. 2008. № 11. С. 20–30.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64–74.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 17–26.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С., Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. Способ среднесрочного прогноза землетрясений // Докл. РАН. 1996. Т. 347. № 3. С. 405–407.
- Тихонов И.Н. Обнаружение и картирование сейсмических затиший перед сильными землетрясениями Японии // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 60–70.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация курилокамчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 303 с.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов в ней, связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91–107.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 29–60.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и рисков 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке на пороге 50-летия // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 35–42.
- Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\lg N = a - bM$ and its confidence limits // Bull. Earthquake Res. Ins. 1965. V. 43. P. 237–239.
- Chan C.-H., Wu Y.-M., Tseng T.-L. et al. Spatial and temporal evolution of b -values before large earthquakes in Taiwan // Tectonophysics. 2012. V. 532–535. P. 215–222.
- Chen C.-C., Wu Y.-X. An improved region-time-length algorithm applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake // Geophys. J. Int. 2006. V. 166. P. 1144–1147.
- Enescu B., Ito K. Some premonitory phenomena on the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake: seismicity, b -value and fractal dimension // Tectonophysics. 2001. V. 338. № 3–4. P. 297–314.
- Gentili S., Bressan G. Seismicity patterns before $M \geq 4.1$ earthquakes in the Friuli-Venezia Giulia (northeastern Italy) and western Slovenia areas // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2007. V. 48. № 1. P. 33–51.
- Giovambattista R., Tyupkin Yu. The fine structure of the dynamics of seismicity before $M \geq 4.5$ earthquakes in the area of Reggio Emilia (Northern Italy) // Annali di Geofisica. 1999. V. 42. P. 897–909.
- Giovambattista R., Tyupkin Yu. Spatial and temporal distribution of seismicity before the Umbria-Marche September 26, 1997 earthquakes // J. of Seismology. 2000. V. 4. P. 589–598.
- Giovambattista R., Tyupkin Yu. Seismicity patterns before the $M = 5.8$ 2002, Palermo (Italy) earthquake: Seismic quiescence and accelerating seismicity // Tectonophysics. 2004. V. 384. № 1–4. P. 243–255.
- Huang Q. Seismicity pattern changes prior to large earthquakes – an approach of the RTL algorithm // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. 2004. V. 15. № 3. P. 469–491.
- Huang Q. Search for reliable precursors: A case study of the seismic quiescence of the 2000 western Tottori prefecture

- earthquake // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. B04301. doi:10.1029/2005JB003982
- Huang Q., Nagao T. Seismic Quiescence before the 2000 $M = 7.3$ Tottori earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 14–19.
- Huang Q., Oncel O., Sobolev G. Precursory seismicity changes associated with the $M_w = 7.4$ 1999 August 17 Izmit (Turkey) earthquake // *Geophys. J. Int.* 2002. V.151. № 1. P. 235–242.
- Huang Q., Sobolev G. Precursory seismicity changes associated with the Nemuro Peninsula earthquake, January 28, 2000 // *Journal of Asian Earth Sciences.* 2002. V. 21. № 2. P. 135–146.
- Huang Q., Sobolev G., Nagao T. Characteristics of the seismic quiescence and activation patterns before the $M = 7.2$ Kobe earthquake, January 17, 1995 // *Tectonophysics.* 2001. V. 337. № 1–2. P. 99–116.
- Imoto M. Changes in the magnitude–frequency b-value prior to large ($M > 6.0$) earthquakes in Japan // *Tectonophysics.* 1991. V. 193. 4. P. 311–325.
- Katsumata K. Precursory seismic quiescence before the $M_w = 8.3$ Tokachi-oki, Japan, earthquake on 26 September 2003 revealed by a re-examined earthquake catalog // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. B10307. doi:10.1029/2010JB007964
- Katsumata K., Kasahara M. Precursory seismic quiescence before the 1994 Kurile Earthquake ($M_w = 8.3$) revealed by three independent seismic catalogs // *Pure and Applied Geophysics.* 1999. V. 155. P. 443–470.
- Kisslinger C. An experiment in earthquake prediction and the 7 May 1986 Andreanof Islands earthquake // *Bull. of the Seismol. Society of America.* 1988. V. 78. № 1. P. 218–229.
- Kisslinger K., Kindel B. A comparison of seismicity rates near Adak island, Alaska, September 1988 through May 1990 with rates before the 1982 to 1986 apparent quiescence // *Bull. of the Seismol. Society of America.* 1994. V. 84. № 5. P. 560–570.
- Murru M., Console R., Montuori C. Seismic quiescence precursor to the 1983 Nihonkai-Chubu ($M7.7$) earthquake, Japan // *Annali di Geofisica.* 1999. V. 42. P. 871–882.
- Nuannin P. The potential of b-value variations as earthquake precursors for small and large events // *Uppsala. Sweden. Acta Universitatis Upsaliensis.* 2006. 46 p.
- Nuannin P., Kulhanek O., Persson L. Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004 // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. 1–4.
- Oncel A., Wilson T. Anomalous seismicity preceding the 1999 Izmit event, NW Turkey // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 169. № 1. P. 259–270.
- Parsons T. Forecast experiment: Do temporal and spatial b value variations along the Calaveras fault portend $M \geq 4.0$ earthquakes? // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. B03308. doi:10.1029/2006JB004632
- Polat O., Gok E., Yilmaz D. Earthquake hazard of Aegen extension region (West Turkey) // *Turkish Journal of Earth Sciences.* 2008. V. 17. P. 593–614.
- Rong D.-L., Li Y.-R. Estimation of characteristic parameters in region-time-length algorithm and its application // *Acta Seismologica Sinica.* 2007. V. 20. № 3. P. 265–272
- Sobolev G.A. The examples of earthquake preparation in Kamchatka and Japan // *Tectonophysics.* 2001. V. 338. № 3–4. P. 269–279.
- Sobolev G.A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. № 11. P. 1–14.
- Sobolev G., Huang Q., Nagao T. Phases of earthquake's preparation and by chance test of seismic quiescence anomaly // *J. of Geodynamics.* 2002. V. 33. № 4–5. P. 413–424.
- Toda S., Matsumura S. Spatio-temporal stress states estimated from seismicity rate changes in the Tokai region, central Japan // *Tectonophysics.* 2006. V. 417. № 1–2. P. 53–68.
- Tsukakoshi Y., Shimazaki K. Temporal behavior of the background seismicity rate in central Japan, 1998 to mid-2003 // *Tectonophysics.* 2006. V. 417. № 1–2. P. 155–168.
- Wiemer S., Wyss M. Seismic quiescence before the Landers ($M = 7.5$) and Big Bear ($M = 6.5$) 1992 earthquakes // *Bull. of the Seismol. Society of America.* 1994. V. 84. № 3. P. 900–916.
- Wu Y.-M., Chiao L.-Y. Seismic Quiescence before the 1999 Chi-Chi, Taiwan, $M_w 7.6$ Earthquake // *Bull. of the Seismol. Society of America.* 2006. V. 96. № 1. P. 321–327.
- Wu Y.-M., Chen C.-C., Zhao L., Chang C.-H. Seismicity characteristics before the 2003 Chengkung, Taiwan, earthquake // *Tectonophysics.* 2008. V. 457. № 3–4. P. 177–182
- Wyss M., Habermann R.E. Precursory seismic quiescence // *Pure and Applied Geophysics.* 1988. V. 126. № 2/4. P. 319–332.
- Wyss M., Martyrosian A.H. Seismic quiescence before the M7, 1988, Spitak earthquake, Armenia // *Geophys. J. Int.* 1998. V. 134. № 2. P. 329–340.
- Wyss M., Wiemer S. How can one test the seismic gap hypothesis? The Case of repeated ruptures in the Aleutians // *Pure and Applied Geophysics.* 1999. V. 155. № 2–4. P. 259–278.
- Wyss M., Wiemer S. Change in the probability for earthquakes in Southern California due to the Landers Magnitude 7.3 Earthquake // *Science.* 2000. V. 290. № 11. P. 1334–1338.
- Wyss M., Console R., Murru M. Seismicity rate change before the Irpinia ($M = 6.9$) 1980 earthquake // *Bull. of the Seismol. Society of America.* 1997. V. 87. № 2. P. 318–326.
- Wyss M., Shimazaki K., Urabe T. Quantitative mapping of a precursory quiescence to the Izu-Oshima 1990 ($M6.5$) earthquake, Japan // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 127. № 3. P. 735–743.
- Wyss M., Sobolev G., Clippard J.D. Seismic quiescence precursors to two M7 earthquakes on Sakhalin Island, measured by two methods // *Earth, Planets and Space.* 2004. V. 56. № 3. P. 725–740.
- Wyss M., Hasegawa A., Wiemer S., Umino N. Quantitative mapping of precursory seismic quiescence before the 1989, $M = 7.1$, off-Sanriki, Japan // *Annali di Geofisica.* 1999. V. 42. P. 851–869.
- Wyss M., Westerhaus M., Berkhemer H., Ates R. Precursory seismic quiescence in the Mudurnu Valley, North Anatolian fault zone, Turkey // *Geophys. J. Int.* 1995. V. 123. № 1. P. 117–124.
- Zuniga R., Wyss M. Most and least likely locations of large to great earthquakes along the Pacific coast of Mexico, estimated from local recurrence times based on b-values // *Bull. of the Seismol. Society of America.* 2001. V. 91. № 6. P. 1717–1728.

A Parametric Representation of Kamchatka Seismicity over Time

V. A. Saltykov, Yu. A. Kugaenko, N. M. Kravchenko, and A. A. Konovalova

*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences,
Petrovsk-Kamchatskii, bul'var Piipa 9, 683006 Russia
e-mail: salt@emsd.ru*

Abstract—This paper presents a set of seismicity parameters that are estimated at the Kamchatka Branch of the Geophysical Service, Russian Academy of Sciences based on the regional catalog data with the purpose of routine monitoring of the current seismic situation in the region. The focus is on the identification of changes in the seismic regime (seismic quiescences and seismicity increases) in earth volumes adjacent to the maturing rupture zone of a large earthquake. The techniques we use include estimation of the seismicity level for the region using the SOUS'09 scale; calculation of the variations in the slope of the recurrence relation, identification of statistically significant anomalies in the slope using the Z test, and calculation of the seismic activity A_{10} ; monitoring the *RTL* parameter and variations in the area of seismogenic ruptures; using the Z test to detect areas of statistically significant decreases in the rate of seismicity; and identification of earthquake clusters. We furnish examples of such anomalies in these seismicity parameters prior to large earthquakes in Kamchatka.