

## II.2. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

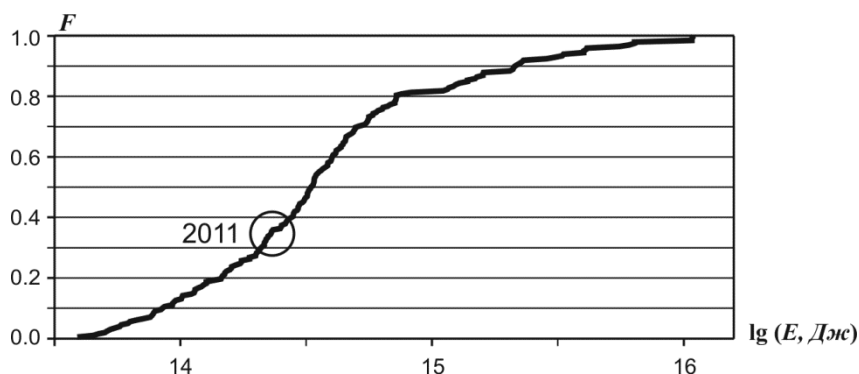
*В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко*

### Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2011 г. и построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности. В комплекс рассматриваемых характеристик входят общая выделившаяся сейсмическая энергия, активность  $A_{10}$ , наклон графика повторяемости  $\gamma$ , параметры методик  $RTL$ -,  $\Delta S$ - и « $Z$ -функция», кластеризация землетрясений. Методики расчета этих параметров описаны в ежегодниках [Землетрясения России в 2006 году, 2009; Землетрясения России в 2007 году, 2009; Землетрясения России в 2008 году, 2010]. При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы РАН [<http://www.emsd.ru/ts/>]. Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного широтой  $\varphi=50.5^\circ\text{N}$  и  $56.5^\circ\text{N}$ , долготой  $\lambda=156.0^\circ\text{E}$  и  $167.0^\circ\text{E}$  и глубиной от 0 до 300 км, в который попадает наиболее сейсмоактивная часть Камчатки. Важным требованием к используемым для анализа сейсмологическим данным является однородность каталога землетрясений. Поэтому нижний энергетический уровень землетрясений был определен как  $K_S=8.5$  по классификации С.А. Федотова [Федотов, 1972], что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [Гордеев и др., 2006]. Для сильнейшего землетрясения 2011 г., причем единственного в диапазоне магнитуд  $M>6.0$  ( $ML=6.3$ ), произошедшего 20 февраля в Камчатском заливе, отдельно рассмотрены предшествующие ему аномалии сейсмического режима.

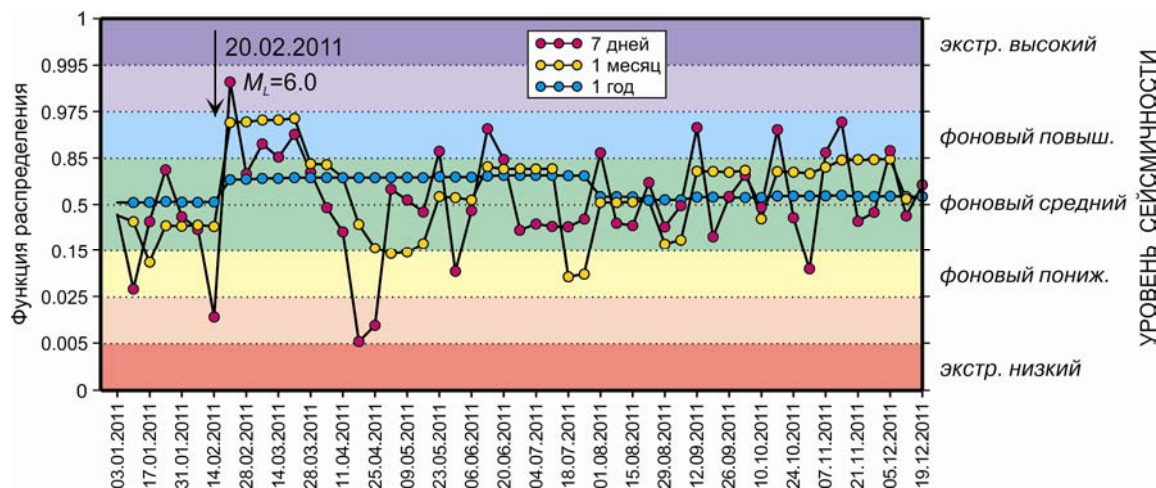
### Результаты исследования

Общая выделившаяся в 2011 г. сейсмическая энергия составила  $2.1 \cdot 10^{14}$  Дж при среднегодовом (за 50 лет) значении  $5.8 \cdot 10^{14}$  Дж и медианном годовом значении  $1.6 \cdot 10^{14}$  Дж. Согласно функции распределения, построенной по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2011 гг., значение функции распределения, соответствующей сейсмической энергии, выделившейся в течение 2011 г., равно  $0.59 \pm 0.07$  (рис. II.12).



**Рис. II.12.** Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при Камчатских землетрясениях в 1962–2011 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2011 г.

Для качественной оценки текущего уровня сейсмичности используется шкала и методика «СОУС’09», разработанная в лаборатории сейсмического мониторинга Камчатского филиала ГС РАН, согласно которой 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 [Салтыков, 2011]. Рис. II.13 отражает изменение оценок уровня сейсмичности Камчатки в течение 2011 года.



**Рис. II.13. Временной ход оценки уровня сейсмичности Камчатки в различных временных окнах в 2011 г.**

Наиболее сильное сейсмическое событие 2011 г. – землетрясение с  $M=6.0$ , произошедшее 20 февраля в Камчатском заливе. Следует отметить снижение регионального уровня сейсмичности до экстремально низкого в коротком временном окне (семь дней) перед этим событием (рис. II.13). Землетрясение сопровождалось афтершоковой последовательностью, состоящей из 33 событий с энергетическими классами  $K_S=8.5-11.4$ . Энергия землетрясения и сопутствующих ему афтершоков ( $1.27 \cdot 10^{14}$  Дж) составила 60% всей выделившейся на Камчатке в 2011 г. сейсмической энергии. Небольшая афтершоковая последовательность, состоящая из 11 землетрясений с  $K_S=8.5-11.1$ , была вызвана землетрясением с  $M=5.6$  ( $K_S=13$ ), произошедшим 7 сентября на востоке Камчатского залива. Наиболее представительный рой землетрясений, состоящий из 45 событий с  $K_S=8.5-12.2$ , зафиксирован в марте в восточной акватории Авачинского залива.

Эпицентры землетрясений 2011 г. с  $K_S \geq 12.5$  и  $2\sigma$ -эллипсы рассеяния группированных землетрясений показаны на рис. II.14 а. Параметры этих сейсмических событий представлены также в табл. II.2. Приведены дата, энергетический класс  $K_S$  и координаты главного события; логарифм суммарной энергии группы землетрясений  $\lg E$  и длительность  $\Delta t$ , определенная как временной интервал, в течение которого произошло 75% сейсмических событий последовательности, обозначен тип последовательности: рой или афтершоки.

**Таблица II.2. Землетрясения с  $K_S \geq 12.5$ , афтершоковые последовательности и рой, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2011 г.**

Параметры главного события					$\lg (E, \text{Дж})$	$\Delta t, \text{дни}$	Тип группы
Дата	$K_S$	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	$h, \text{км}$			
20.02.2011	14.1	55.73	162.47	48	14.1	5	афтершоки
05.03.2011	12.2	52.58	161.34	16	12.8	13	рой
07.09.2011	13.0	55.58	163.36	65	13.0	23	афтершоки

Афтершоковые последовательности в силу своего компактного расположения в пространстве и во времени могут существенно исказить характеристики фоновой сейсмичности. Программа, используемая для их выделения, создана В.Б. Смирновым (МГУ им. М.В. Ломоносова) и реализует алгоритм, описанный в работе [Молчан, Дмитриева, 1991]. Число выделенных по этой методике землетрясений в 2011 г. составило около 15 % от общего количества сейсмических событий. Карта эпицентров независимых землетрясений 2011 г. представлена на рис. II.14 б.

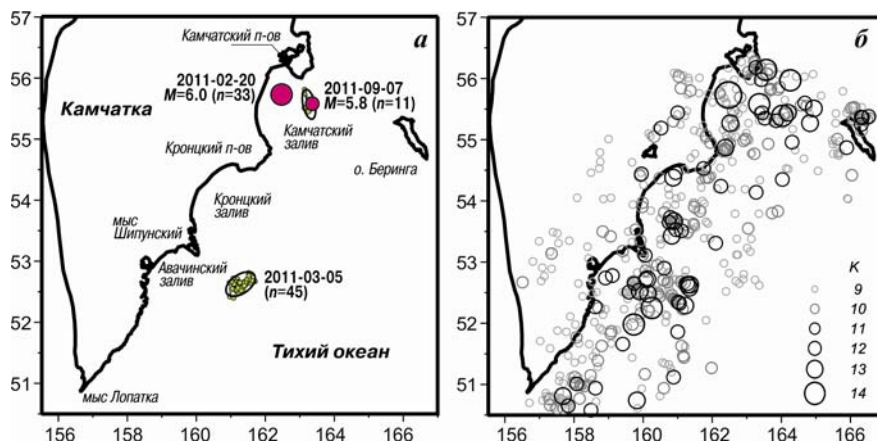


Рис. II.14. Сейсмичность Камчатки в 2011 г.:

*а* – эпицентры землетрясений с  $K_S \geq 12.5$  и группы землетрясений (показаны  $2\sigma$ -эллипсы аппроксимации зоны группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений и количество землетрясений в группе); *б* – эпицентры независимых землетрясений 2011 г. с  $K_S = 9-14$

#### Вариации наклона графика повторяемости $\gamma$

Наклон графика повторяемости  $\gamma$  в 2011 г. равен  $0.47 \pm 0.02$ , что практически соответствует в пределах ошибки среднемноголетнему значению ( $0.50 \pm 0.02$ ).

Карты площадного распределения наклона графика повторяемости землетрясений  $\gamma$ , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 150 км, представлены на рис. II.15.

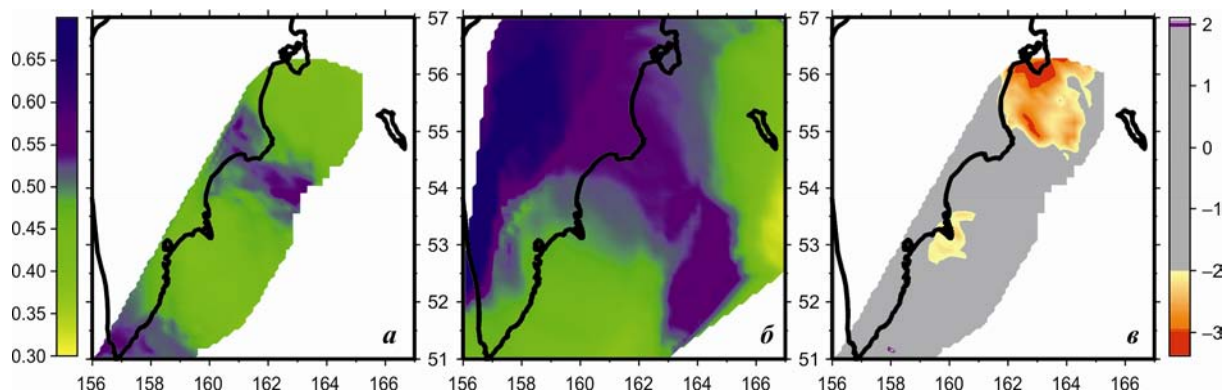


Рис. II.15. Средние значения наклона графика повторяемости  $\gamma$  в 2011 г. (*а*) и 1962–2011 гг. (*б*). Изменение  $\gamma$  в 2011 г., по сравнению с многолетним фоном, нормированное на среднеквадратичное отклонение (*в*)

Отмечается региональная особенность в распределении  $\gamma$ : его повышенные значения соответствуют продолжению Императорского хребта, уходящему под Камчатку в районе Кроноцкого полуострова. Этот эффект ярко проявляется при длительном (50 лет) осреднении (рис. II.15 б), когда случайные или кратковременные вариации  $\gamma$  нивелируются.

При сравнении карт  $\gamma$ , рассчитанных для 2011 г. и для всего времени детальных наблюдений, выделяются следующие особенности распределения  $\gamma$  в 2011 г.: уменьшение в районе Камчатского залива и мыса Шипунского, увеличение на юге Камчатки.

Для выявления статистически значимых изменений  $\gamma$  применяется Z-тест. На рис. П.15 в показана карта нормированной вариации  $Z_\gamma$  для 2011 г., по сравнению с многолетним фоном. Карта построена при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса  $R$  с фиксированным количеством попавших в них землетрясений  $N$  (в данном случае  $N=100$ ). Статистическая достоверность уменьшения  $\gamma$  в районе Камчатского залива и Камчатского полуострова высока – на уровне значимости  $\alpha=0.01$ .

Для района мыса Шипунский (уменьшение  $\gamma$ ) и мыса Лопатка (увеличение  $\gamma$ ) статистическая значимость вариаций ниже – на уровне  $\alpha=0.05$ . Следует отметить, что увеличение  $\gamma$  на юге Камчатки было отмечено впервые по данным 2009 г. [Салтыков, Кравченко, 2011]. Эта аномалия сохраняет свое пространственное положение, но можно предположить на основе значений  $Z$ , что она вырождается.

#### Сейсмическая активность $A_{10}$

Средняя по указанному району активность  $A_{10}$  в 2011 г. составила  $0.254 \pm 0.006$  при среднемноголетнем значении  $0.279 \pm 0.001$ . Таким образом, в целом активность региона была ниже среднего уровня на  $\approx 9\%$ .

Карты значений активности  $A_{10}$ , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 50 км, приведены на рис. П.16. Распределение активности  $A_{10}$  в 2011 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Камчатского, Кроноцкого и Авачинского заливов, при этом восточнее Авачинского и Камчатского заливов активность существенно превысила средние значения.

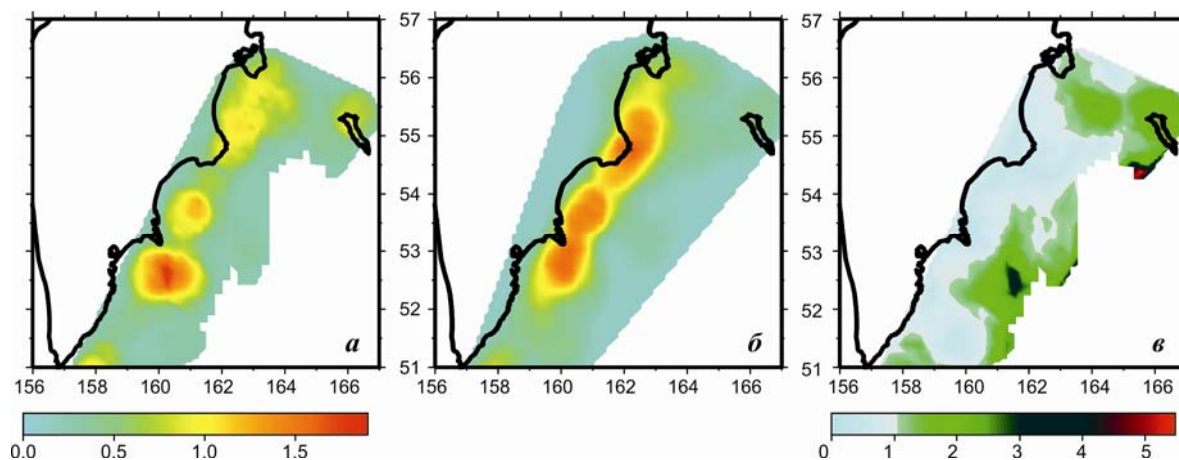


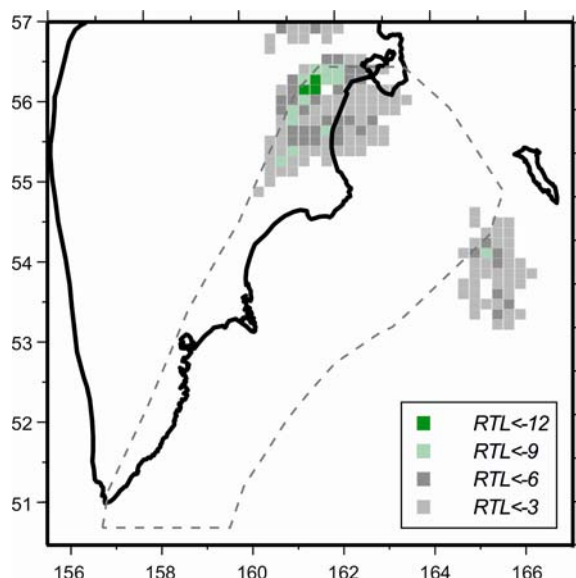
Рис. П.16. Средние значения сейсмической активности  $A_{10}$  в 2011 г. (а) и 1962–2011 гг. (б). Относительная сейсмическая активность  $A_{10}$  в 2011 г., по сравнению со средней многолетней активностью (в)

#### Мониторинг параметров $RTL$ и $\Delta S$

На рис. П.17 показана карта минимальных значений параметра  $RTL$ , наблюдавшихся в течение 2011 г. в сейсмоактивной области Камчатки. Пунктиром отмечена область сканирования, для которой количество землетрясений, приходящихся на расчетный цилиндр, не менее 750. Аномалия, определенная за пределами этой области, не считается достоверной. Как следует из рисунка, значительных аномалий по параметру  $RTL$  в течение 2011 г. не наблюдалось.

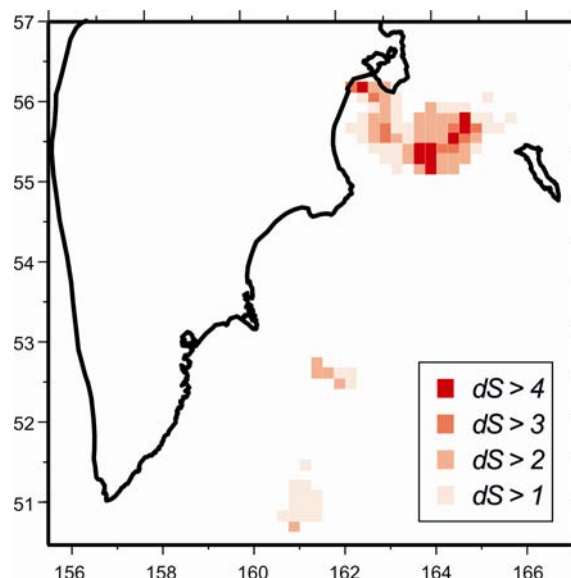
На следующем за  $RTL$ -аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности  $RTL$ -аномалии, согласно методике Г.А. Соболева [Соболев, 1999], должна проявиться форшоковая активизация.

На рис. II.18 представлена карта вариаций площади сейсмогенных разрывов  $\Delta S$  в 2011 году. Область повышенных значений площади сейсмогенных разрывов  $\Delta S$  в Камчатском заливе приходится на область сейсмического затишья по параметру  $RTL$ , закончившегося в апреле 2010 г. [Салтыков, Кравченко, 2011].



**Рис. II.17. Минимальные значения  $RTL$ -параметра в 2011 г.**

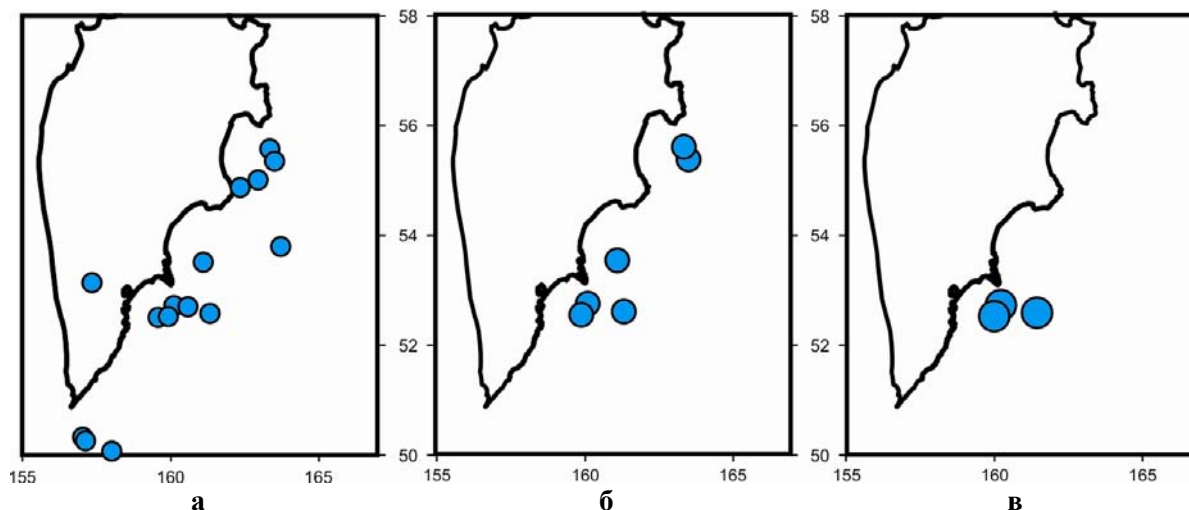
Пунктиром отмечена область надежного определения параметра  $RTL$



**Рис. II.18. Значения  $\Delta S$ -параметра, рассчитанные на декабрь 2011 г.**

### Контроль кластеризации землетрясений

На рис. II.19 отмечены кластеры, выделенные в 2011 г. в зоне мониторинга сейсмичности Камчатки. Распределение кластеров по сейсмофокальной области неравномерно. Обращают на себя внимание группы кластеров в Камчатском и Авачинском заливах. Кластеры землетрясений с наибольшими по энергии главными событиями ( $K_0=11.5$ ) приурочены к восточной части акватории Авачинского залива.



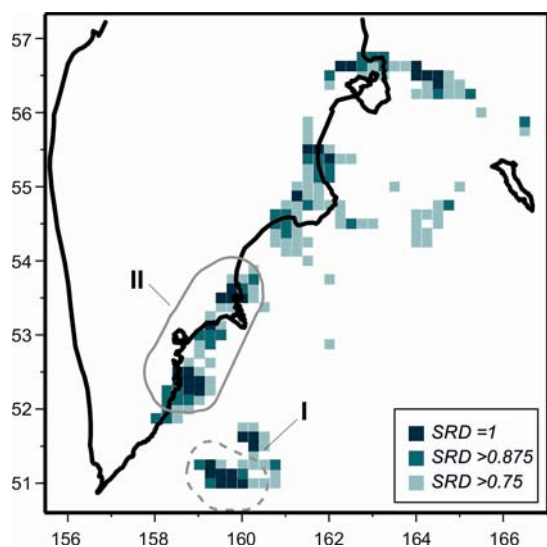
**Рис. II.19. Эпицентры главных событий кластеров землетрясений 2011 г. при различных значениях параметров  $k_0$  и  $K_0$ :**

$a - k_0=8.5, K_0=9.5$ ;  $б - k_0=9.5, K_0=10.5$ ;  $в - k_0=10.5, K_0=11.5$ .

$k_0$  – минимальный класс землетрясений в кластере (первое землетрясение),  
 $K_0$  – минимальный класс основного события в кластере (последнее землетрясение)

**Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»**

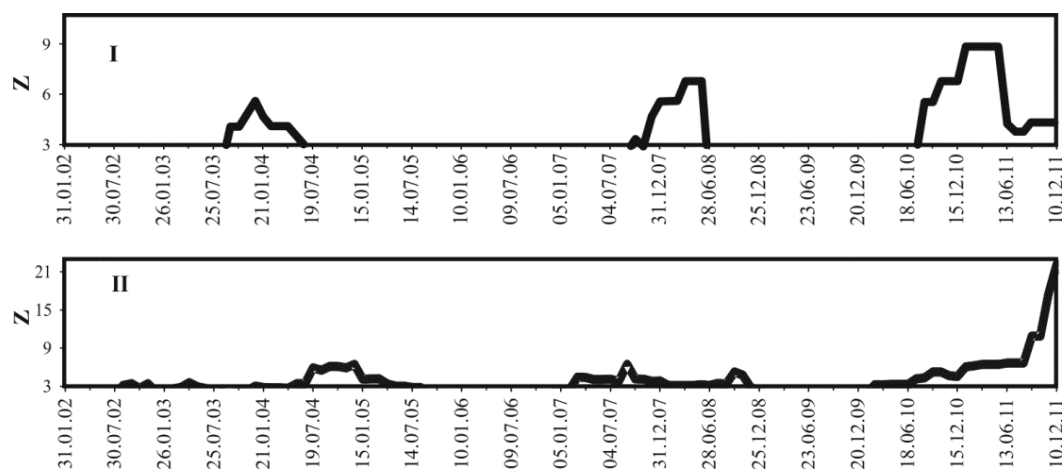
В 2011 г. в сейсмоактивной области Камчатки существовали две пространственные области (рис. П.20), выделенные с помощью «Z-функции» и представляющие интерес в качестве возможного предвестника сильного землетрясения.



**Рис. П.20. Карта значений  $SRD > 0.75$  в течение 2011 года.**

Пунктиром отмечена область уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз в течение не менее года, сплошной линией – область абсолютного сейсмического затишья

Графики функции  $Z(t)$ , рассчитанные для выделенных зон сейсмической аномалии в скользящем временном окне 12 месяцев, приведены на рис. П.21. В зоне I (рис. П.20) уменьшение скорости сейсмического потока в восемь раз наблюдалось с ноября 2009 г. по май 2011 г. В зоне II в течение 2011 г. не произошло ни одного землетрясения с  $K_S \geq 8.5$ .



**Рис. П.21. Зависимости  $Z(t)$ , рассчитанные для зон I и II (рис. П.22) сейсмического затишья в скользящем окне шириной 12 месяцев**

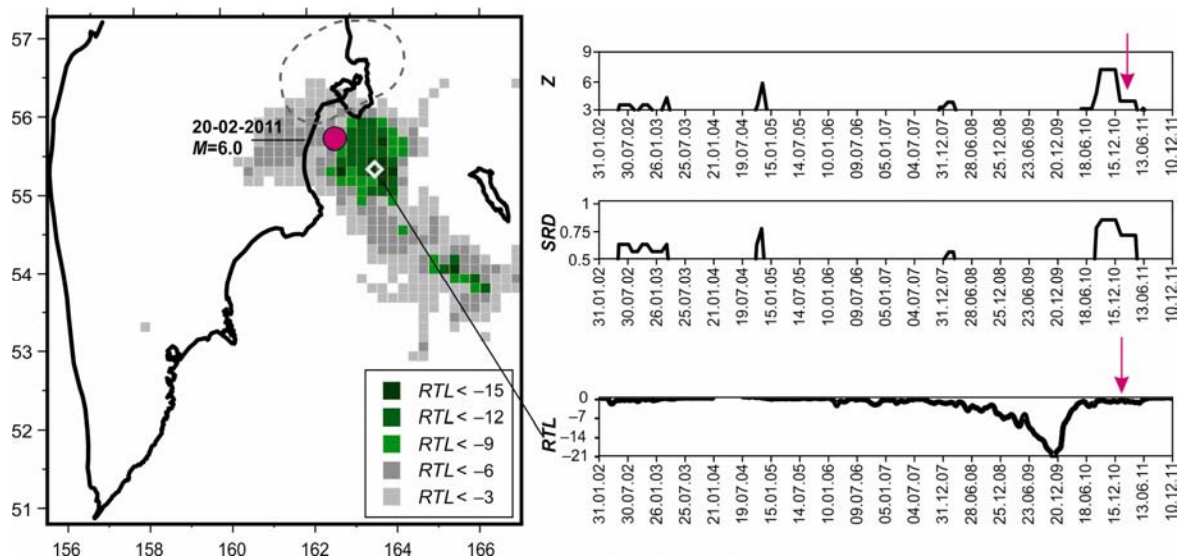
**Аномалии сейсмического режима, предшествовавшие землетрясению 20.02.2011 года**

Землетрясению 20 февраля с  $M=6.0$  предшествовало появление ряда аномалий в сейсмическом режиме, имеющих предвестниковый характер. В частности, в территориальной близости от эпицентра землетрясения были выявлены сейсмические затишья по двум независимым методикам («Z-функция» и  $RTL$ ) и группа кластеров.

Расположение  $RTL$ - и  $Z$ -аномалий показано на рис. П.22. Сейсмическое затишье по параметру  $RTL$  представлено в виде карты минимальных значений  $RTL$  за время развития аномалии.  $Z$ -аномалия (область уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз) околнурена пунктирной линией. Приведены графики  $Z(t)$  и  $SRD(t)$ , рассчитанные для временного окна  $dT=12$  месяцев для области  $Z$ -аномалии, и временной

ход параметра  $RTL$  в расчетной точке с минимальным значением  $RTL$ .  $Z$ -аномалия наблюдалась в течение 15 месяцев – с октября 2009 г. по декабрь 2010 года. Землетрясение произошло на границе области затишья спустя два месяца после его окончания.

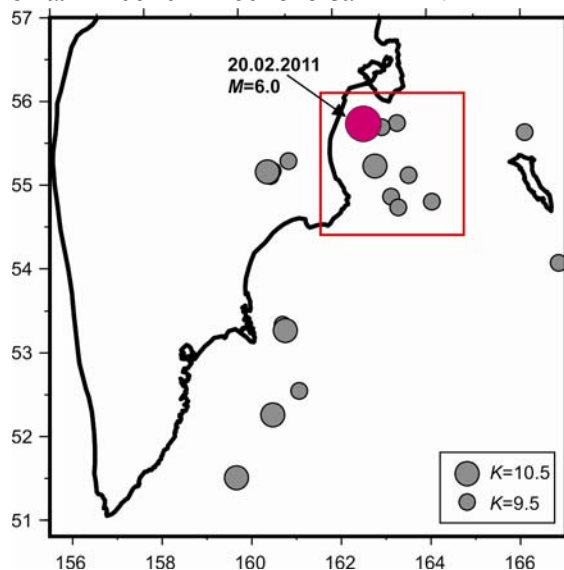
$RTL$ -аномалия проявилась в 2008 г., минимальных значений параметр  $RTL$  достигал осенью 2009 г., длительность затишья составляет около двух лет. Землетрясение произошло в пределах аномальной области спустя десять месяцев после выхода параметра  $RTL$  на фоновый уровень.



**Рис. II.22. Схема расположения  $RTL$ - и  $Z$ -аномалий, предшествующих землетрясению 20.02.2011 г.**

Показана карта минимальных значений  $RTL$  за все время развития аномалии. Область уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз ( $Z$ -аномалия) околнурена пунктиром. Приведены графики  $Z(t)$ ,  $SRD(t)$  и  $RTL(t)$  для соответствующих аномалий. Отмечены эпицентр землетрясения (кружок на схеме) и время его возникновения (стрелка на графиках)

На рис. II.23 показаны кластеры землетрясений с классами основных событий 9.5 и 10.5, выявленные в 2010 году. Визуально выделяется значительная группа кластеров в Камчатском заливе, равномерно распределенных на области аномальных значений параметра  $RTL$  (рис. II.22). Кластеры образовались в январе–мае 2010 г., т.е. соответствуют этапу выхода параметра  $RTL$  на фоновый уровень, следовательно, окончанию аномалии сейсмического затишья.



**Рис. II.23. Карта эпицентров главных событий кластеров землетрясений 2011 года. Отмечен эпицентр землетрясения 20.02.2011 г.**

### Заключение

На основе региональных каталогов Камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2011 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность  $A_{10}$ , наклон графика повторяемости  $\gamma$ , параметры методик *RTL*-,  $\Delta S$ - и «*Z*-функции». Проведено сравнение значений параметров  $A_{10}$  и  $\gamma$ , полученных для 2011 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2011 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2011 г., в целом не противоречащие друг другу, несмотря на различие методик мониторинга:

- на севере Камчатки (в Камчатском заливе) наблюдаются повышенные значения площади сейсмогенных разрывов  $\Delta S$  и активности  $A_{10}$ , статистически значимое уменьшение  $\gamma$ , кластеры землетрясений;

- на юге Камчатки наблюдаются повышенные значения активности  $A_{10}$ , завершилась *Z*-аномалия;

- в Авачинском заливе наблюдается абсолютное сейсмическое затишье, определяемое по *Z*-методике, повышенные значения активности  $A_{10}$  и кластеры землетрясений с энергетическим классом главных событий  $K_0=11.5$ .

Отмечено снижение регионального уровня сейсмичности перед наиболее сильным землетрясением 2011 года – 20.02.2011 г. с  $M=6.0$ .

Учитывая хорошее пространственно-временное соответствие ряда признаков, имеющих потенциально предвестниковый характер, можно сделать заключение о повышенной сейсмической опасности района Камчатского залива и юга Камчатки. Этот вывод соответствует долгосрочному прогнозу академика С.А. Федотова [*Федотов и др.*, 2008].

Представленные материалы были своевременно рассмотрены при оценке развития сейсмической обстановки на Камчатке Российским экспертным советом по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.