

Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

В настоящей статье представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2014 году. Рассматриваются такие параметры как общая выделившаяся сейсмическая энергия, оценка уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL*-, *dS*- и «*Z*-функция». Методики расчета этих параметров описаны в ежегоднике [1]. При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы РАН [2]. Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного широтой $\varphi=50.5$ и 56.5°N , долготой $\lambda=156.0$ и 167.0°E , глубиной от 0 до 300 км. Выбор зоны определяется однородностью каталога землетрясений за время детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г.). Нижний энергетический уровень землетрясений был определен как $K_S=8.5$ по классификации С.А. Федотова [3], что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [4].

Результаты исследования

Энергия землетрясений Камчатки

Общая выделившаяся в 2014 г. сейсмическая энергия составила $2.05 \cdot 10^{14}$ Дж, при среднегодовом (за 53 года) значении $6.53 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.71 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2014 гг. (рис. II.12). Для 2014 г. функция распределения сейсмической энергии составляет 0.56 ± 0.07 , что соответствует в пределах ошибки медианному значению.

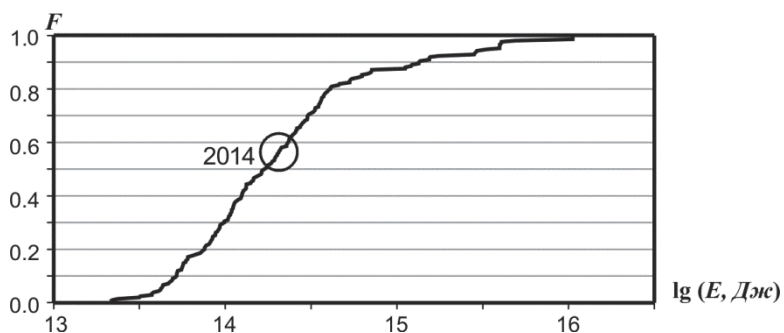


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при камчатских землетрясениях в 1962–2014 гг.

Кружком отмечено значение, соответствующее 2014 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 [5]. Рис. II.13 отражает изменение оценок уровня сейсмичности Камчатки в течение 2014 года. Повышение регионального уровня сейсмичности до высокого во временном окне семь дней обусловлено наиболее сильными сейсмическими событиями 2014 г.: землетрясением с магнитудой $M_L=6.0$ в районе острова Беринга 3 июля и землетрясением с магнитудой $M_L=6.3$, произошедшим 2 октября на юге Авачинского залива. Выделившаяся при этих землетрясениях энергия составила 73% общей сейсмической энергии 2014 года.

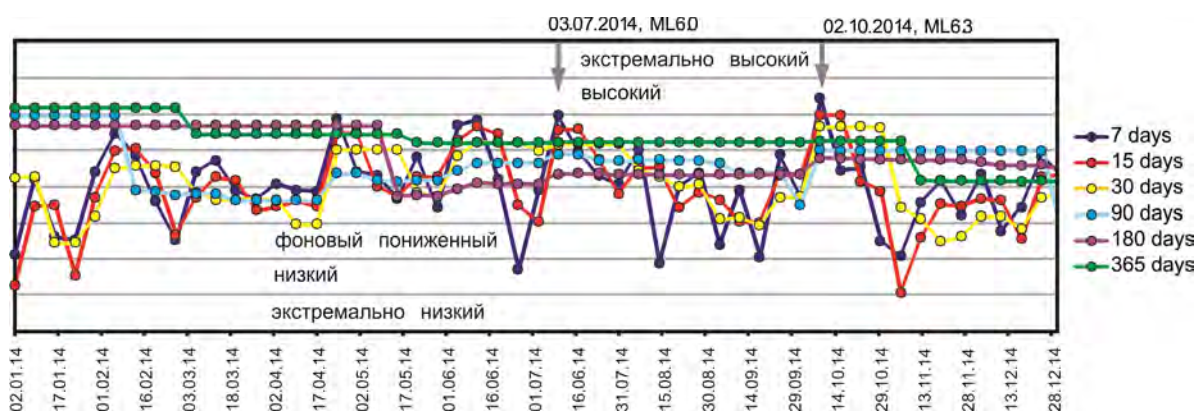


Рис. П.13. Временной ход оценки уровня сейсмичности Камчатки в различных временных окнах в 2014 г.

Помимо этого, оценка уровня сейсмичности рассчитывалась в пространственных областях, определенных в соответствии с регионализацией сейсмоактивного объема Камчатки и прилегающих территорий [6], учитывающей тектоно-географическое положение землетрясений. В табл. П.2 приведены оценки для шести из десяти выделенных зон (для которых возможны статистические оценки) и для четырех подрегионов Камчатки, определяемых географическим положением.

Таблица П.2. Оценка уровня сейсмичности в 2014 г. для различных пространственных областей сейсмоактивной зоны Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$2.0 \cdot 10^{13}$	0.96 ± 0.04	фоновый повышенный
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$1.6 \cdot 10^{13}$	0.11 ± 0.06	фоновый пониженный
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$1.7 \cdot 10^{14}$	0.6 ± 0.1	фоновый средний
Корякский сейсмический пояс	$3.2 \cdot 10^{11}$	0.5 ± 0.1	фоновый средний
Командорский сегмент Алеутской дуги	$7.9 \cdot 10^{13}$	0.78 ± 0.08	фоновый средний
Континентальные области Камчатки	$6.8 \cdot 10^9$	0.19 ± 0.07	фоновый средний
Камчатский залив	$2.5 \cdot 10^{12}$	0.46 ± 0.07	фоновый средний
Кроноцкий залив	$2.0 \cdot 10^{12}$	0.35 ± 0.07	фоновый средний
Авачинский залив	$1.0 \cdot 10^{14}$	0.96 ± 0.03	фоновый повышенный
Юг Камчатки (от мыса Лопатка до Авачинского залива)	$1.1 \cdot 10^{14}$	0.94 ± 0.03	фоновый повышенный

Эпицентры землетрясений 2014 г. с $ML=5.5$ и эллипсы рассеяния группированных землетрясений показаны на рис. 3 а. Параметры этих сейсмических событий представлены в табл. П.3. Приведены дата, энергетический класс K_s , локальная магнитуда ML и координаты главного события; логарифм суммарной энергии группы землетрясений $\lg E$ и длительность Δt , определенная как временной интервал, в течение которого произошло 75% сейсмических событий последовательности, обозначен тип последовательности: рой или афтершоки.

Число группируемых землетрясений в 2014 г. составило 20% от общего количества сейсмических событий. Группируемые, зависимые события (афтершоковые последовательности и рои) из каталога удалены, поскольку в силу своего компактного расположения в пространстве–времени они могут существенно исказить характеристики фоновой сейсмичности. Используемая для этого программа В.Б. Смирнова (МГУ им. М.В. Ломоносова) реализует алгоритм, описанный в [7]. Карта эпицентров независимых землетрясений 2014 г. представлена на рис. П.14 б.

Таблица П.2. Землетрясения с $ML \geq 5.5$, афтершоковые последовательности и рои, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2014 г.

дата	Параметры главного события					$\lg(E, Дж)$	Δt , дни	Тип группы
	K_S	ML	φ , °N	λ , °E	h , км			
31.01.2014	12.8	5.7	54.56	160.02	177	12.8		—
20.04.2014	13.3	5.9	53.18	162.99	86	13.3		—
31.05.2014	13.1	5.8	54.98	165.55	40	13.2	80	афтершоки
06.07.2014	13.3	5.9	50.55	157.33	65	13.3	12	афтершоки
03.07.2014	13.4	6.0	55.19	166.86	42	13.7	14	афтершоки
29.07.2014	10.9	4.7	55.12	163.33	54	11.5	5	рой
02.10.2014	14.0	6.3	52.19	158.37	148	14.0		—
12.10.2014	11.1	4.8	55.10	162.79	61	11.6	5	рой

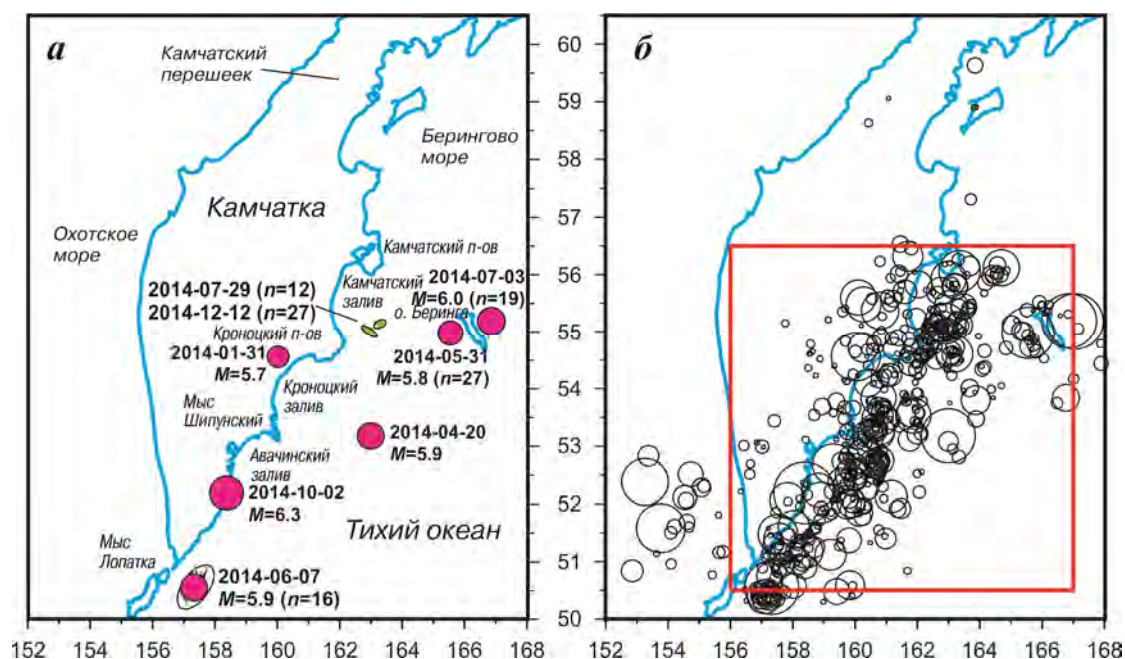


Рис. П.14. Сейсмичность Камчатки в 2014 г.:

а – эпицентры сильных землетрясений и соответствующие им группы (показаны эллипсы рассеяния, содержащие 90 % группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений); *б* – эпицентры независимых землетрясений 2014 г. с $K_S=9-14$, отмечена наиболее сейсмоактивная зона

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2014 г. равен 0.49 ± 0.02 , что соответствует среднеголетнему значению 0.498 ± 0.003 .

Карты площадного распределения наклона графика повторяемости землетрясений γ , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 100 км, представлены на рис. П.15. Непосредственно по данным 2014 г. значимых аномалий не обнаружено, поэтому приведены результаты за три года – для 2012–2014 гг. Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест. Статистическая достоверность уменьшения γ в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова высока – на уровне $\alpha=0.01$. Аномалия в Камчатском заливе обнаружена ранее [8]. Следует отметить, что аномалия увеличенных значений γ на юге Камчатки у мыса Лопатка продолжает вырождаться в соответствии с отмеченной ранее тенденцией [8].

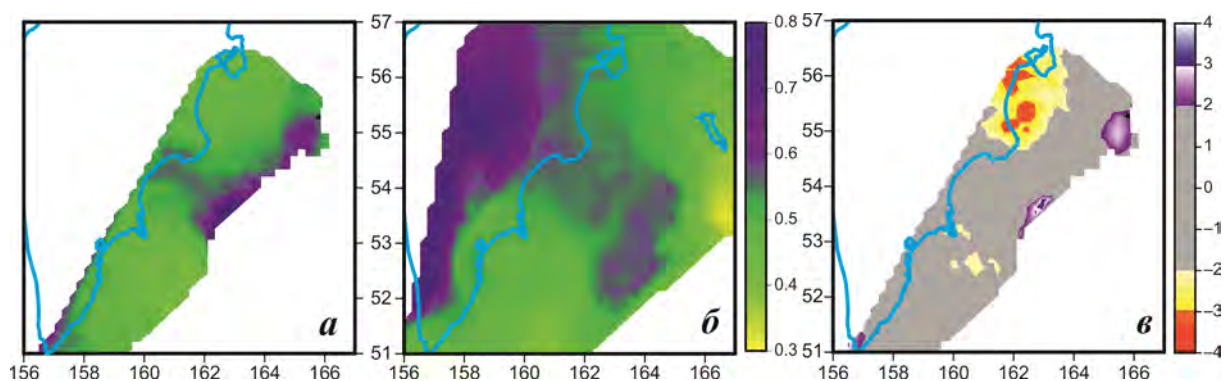


Рис. П.15. Средние значения наклона графика повторяемости γ в 2012–2014 гг. (а) и 1962–2012 гг. (б). Изменение γ в 2012–2014 гг. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на среднеквадратичное отклонение (в)

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по указанному району активность A_{10} в 2014 г. составила 0.224 ± 0.006 при среднемноголетнем значении 0.276 ± 0.001 . В целом активность региона была ниже среднего почти на 20%. 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 2014 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Кроноцкого, Шипунского полуостровов, Авачинского и Кроноцкого заливов, при этом восточнее Авачинского залива и на юге Камчатки активность превысила средние значения.

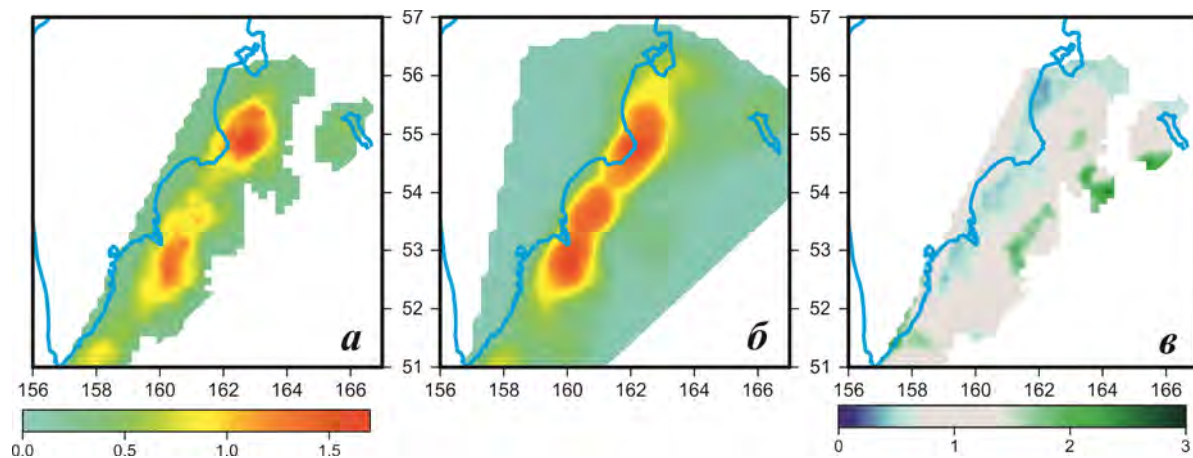


Рис. П.16. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2014 г. (а) и 1962–2012 гг. (б). Относительная сейсмическая активность A_{10} в 2014 г. по сравнению со средней многолетней активностью (в)

Мониторинг параметров RTL и dS

На рис. П.17 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2014 г. в сейсмоактивной области Камчатки. Штриховой линией отмечена область надежного определения параметра RTL . В расчете участвуют сейсмические события с глубинами гипоцентров 0–100 км. Для характерных точек аномалии, приходящихся на зону надежного определения, рассчитан временной ход параметра RTL , согласно которому сейсмическое затишье проявилось летом 2014 г. (рис. П.19).

На следующем за RTL -аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности RTL -аномалии, согласно методике Г.А. Соболева [9], должна проявиться форшоковая активизация.

На рис. П.18 представлена карта вариаций площади сейсмогенных разрывов dS в 2014 году. Область повышенных значений dS выделяется южнее острова Беринга и граничит с аномалией сейсмического затишья по параметру RTL (рис. П.17). Согласно графику временного хода параметра dS (рис. П.20), сейсмическая активизация проявилась практически одновременно с аномалией затишья (рис. П.19).

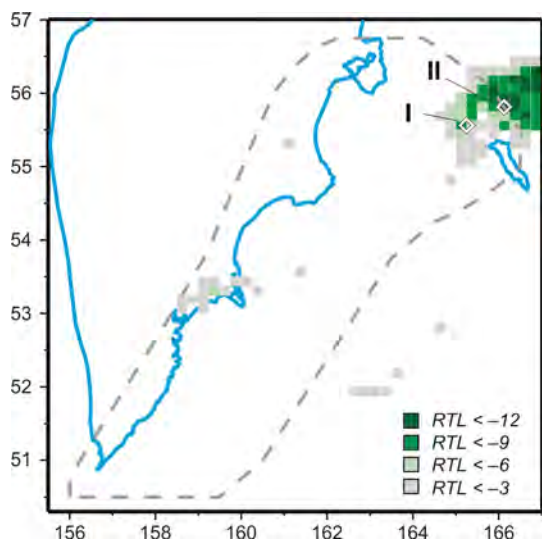


Рис. П.17. Минимальные значения RTL -параметра в 2014 г.

Ромбами отмечены характерные точки аномалии сейсмического затишья, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

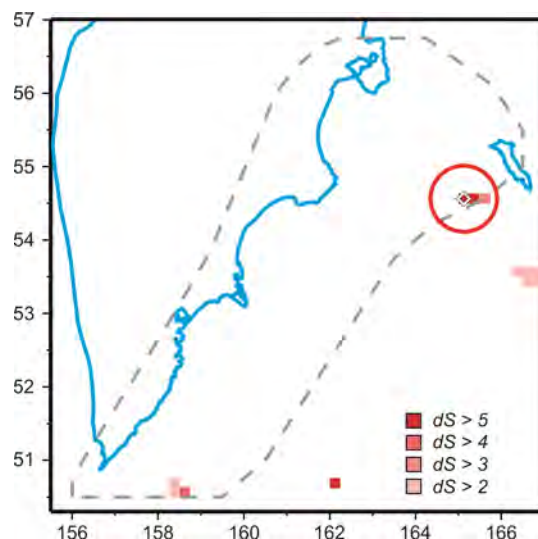


Рис. П.18. Значения dS -параметра, рассчитанные на декабрь 2014 г.

Ромбом отмечена характерная точка аномалии сейсмической активизации. Окружность соответствует размеру аномалии

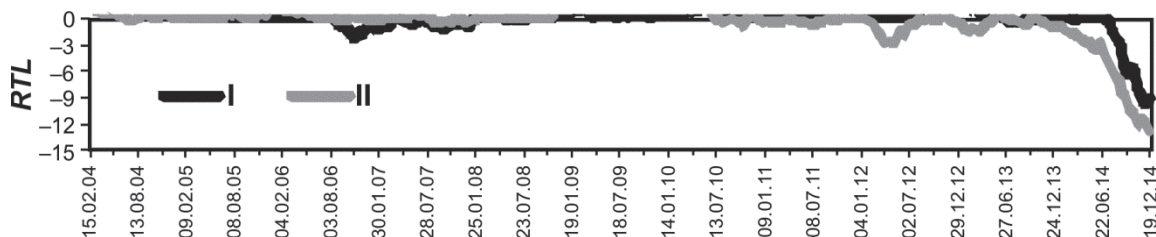


Рис. П.19. Временной ход RTL -параметра в характерных точках аномалии (рис. П.17)



Рис. П.20. Временной ход dS -параметра в характерной точке аномалии (рис. П.18)

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

В 2014 г. в сейсмоактивной области Камчатки с помощью «Z-функции» были выделены две пространственные области сейсмического затишья (рис. П.21). Графики функции $Z(t)$, рассчитанные для выделенных зон сейсмической аномалии в скользящем временном окне 12 месяцев, приведены на рис. П.22. В зоне I (рис. П.20) уменьшение скорости сейсмического потока в 14 раз ($SRD=0.93$) наблюдалось в течение 18 месяцев – с начала 2013 г. до середины 2014 года. В зоне II в 2014 г. не было зафиксировано ни одного землетрясения с $K_S \geq 8.5$.

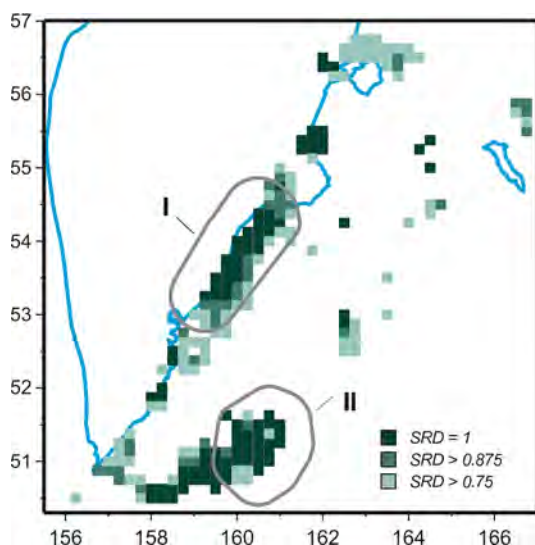


Рис. II.21. Карта значений $SRD > 0.75$ в течение 2014 г. Области сейсмического затишья околнурены сплошной линией

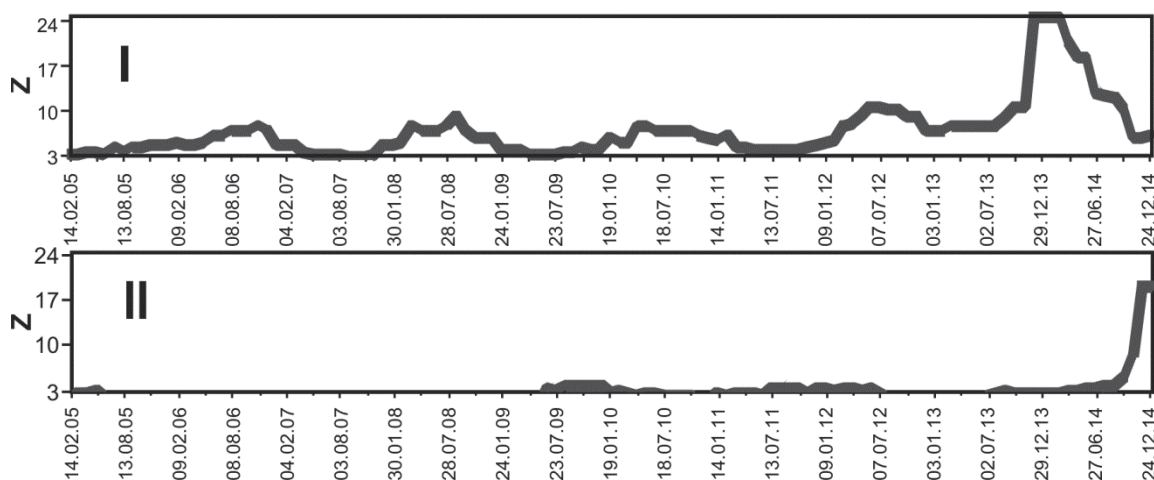


Рис. II.22. Зависимости $Z(t)$, рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. II.21) в скользящем окне шириной 12 месяцев

Заключение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2014 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик RTL -, dS - и « Z -функции». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2014 г. с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2014 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2014 г.:

- наклон графика повторяемости: пониженные значения в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова, аномалия увеличенных значений γ на юге Камчатки у мыса Лопатка продолжает вырождаться;

- активность A_{10} : снижение активности в районе Кроноцкого и Шипунского полуостровов, Авачинского и Кроноцкого заливов, повышенные значения восточнее Авачинского залива и на юге Камчатки;

- сейсмическое затишье по параметру RTL в районе о. Беринга соседствует с аномалией сейсмической активизации по параметру dS . Аномалии развиваются одновременно с июня 2014 г.;

- Z -функция: на юге сейсмоактивной зоны в течение всего 2014 г. наблюдалось абсолютное сейсмическое затишье, уменьшение сейсмического потока в 14 раз в течение полутора лет отмечено в районе Кроноцкого залива.

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 [10].

Литература

1. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2009 году. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 58–62.
2. Part_IV-2014. 11_Kamchatka-and-Komandor-Islands_2014.xls // Землетрясения России в 2014 году. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – Приложение на CD-ROM.
3. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
4. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 6–27.
5. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
6. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 41–64.
7. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. – Вып. 24. – М.: Наука, 1991. – С. 19–50.
8. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 70–76.
9. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 4/5. – С. 63–72.
10. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006–2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения 15.XI.2006 г., $M_S=8.2$ // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 3. – С. 3–25.