

Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, А.А. Коновалова

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2022 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* и «*Z*-функция». Методики расчета этих параметров описаны в ежегоднике [1]. При расчетах использованы камчатские региональные каталоги [2, 3]. Оценки параметров получены для Камчатской сейсмоактивной области (КСО) – 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 [4], что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [5].

Результаты исследования

Энергия землетрясений Камчатки

Общая выделившаяся в 2022 г. сейсмическая энергия составила $8.22 \cdot 10^{13}$ Дж при среднегодовом (за 61 год) значении $2.55 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.92 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2022 гг. (рис. II.12). Для 2022 г. значение функции распределения сейсмической энергии составляет 0.25 ± 0.06 , что позволяет рассматривать 2022 г. как год с фоновой средней сейсмичностью.

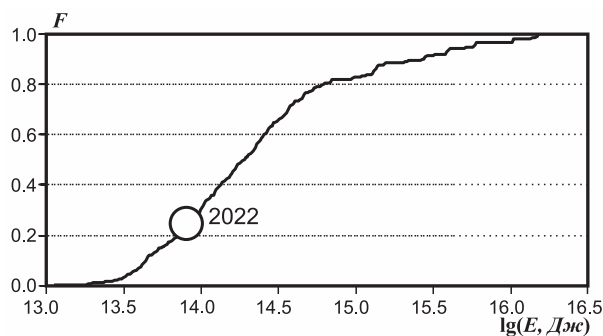


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях в КСО в 1962–2022 гг.

Кружком отмечено значение, соответствующее 2022 г.

Для качественной оценки текущего уровня сейсмичности используется шкала и методика «СОУС'09», 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 [6]. Рис. II.13 отражает изменение оценок уровня сейсмичности КСО в целом в течение 2022 г. в различных временных окнах. Землетрясения 2022 г. не превышали по магнитуде M_L величины 5.9. В этом случае высокий уровень сейсмичности не наблюдался даже в коротких временных окнах.

Локальные аномалии уровня сейсмичности в 2022 г. показаны на карте уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», полученной при сканировании пространства вертикальными цилиндрами с радиусами 70 и 400 км (рис. II.14).

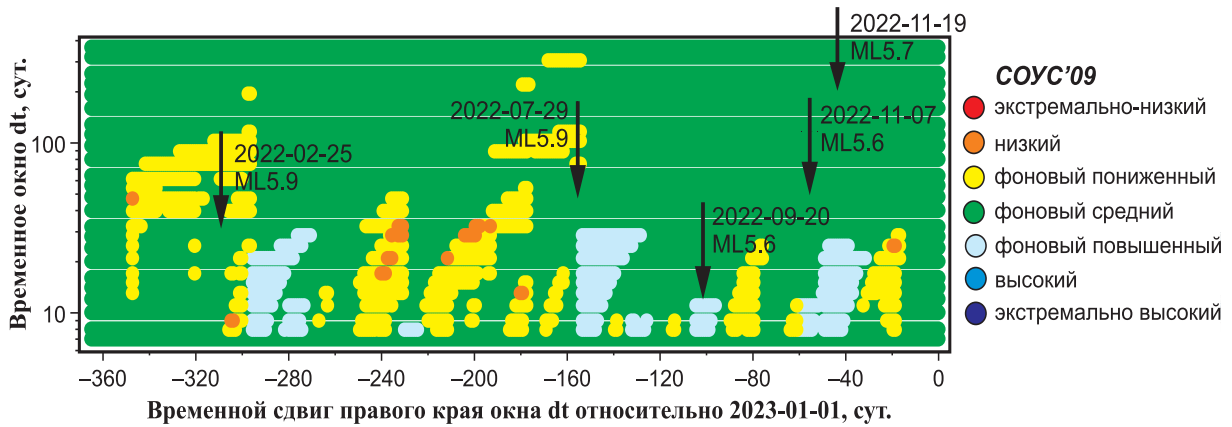


Рис. 11.13. Временной ход уровня сейсмичности КСО в различных временных окнах в 2022 г.

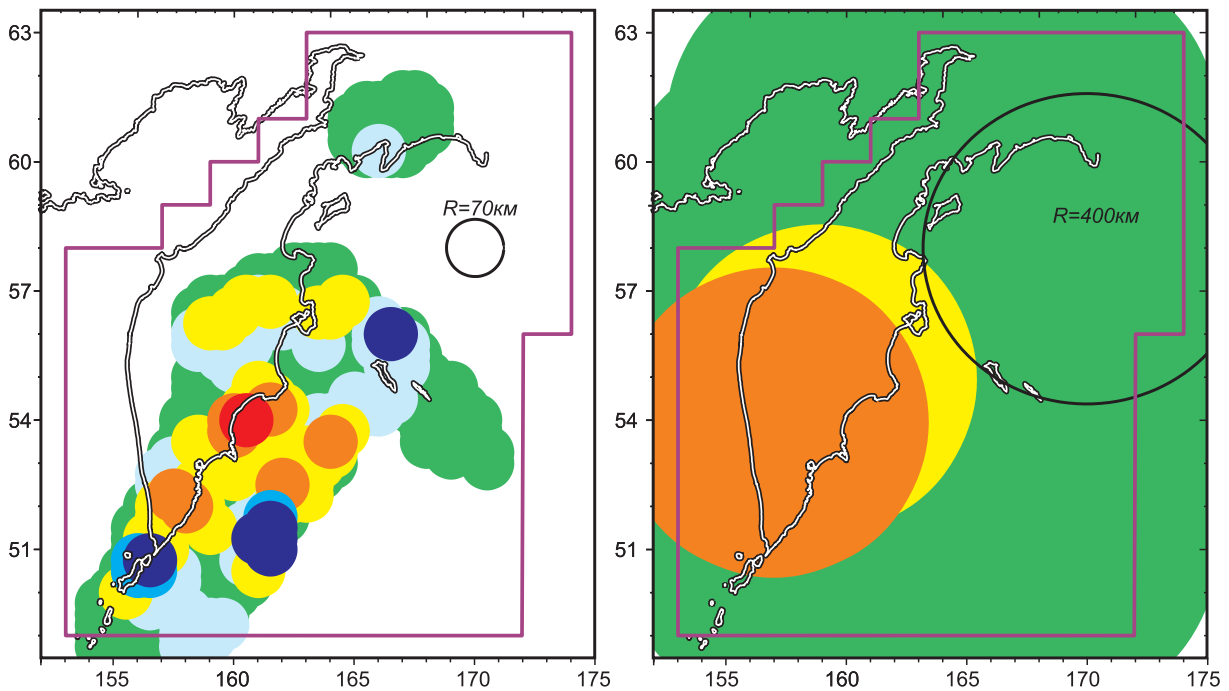


Рис. 11.14. Горизонтальные вариации уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09» масштаба 140 км (слева) и 800 км (справа) в 2022 г.

Цветовой код соответствует рис. 11.13. Отмечена зона ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН

Карты различного масштаба предназначены для визуализации локальных или региональных особенностей сейсмичности. На локальном пространственном масштабе выделяются три области экстремально высокого уровня сейсмичности – в районе мыса Лопатка и острова Парамушир, севернее острова Беринга и в районе глубоководного желоба восточнее Южной Камчатки, – обусловленные наиболее сильными землетрясениями 2022 г. [2, 3] – 16 мая в 05^h25^m с $ML=6.2$ ($M_w=5.6$), 25 февраля в 13^h48^m с $ML=5.9$ ($M_w=5.3$) и 29 июля в 23^h05^m с $ML=5.9$ ($M_w=5.7$) соответственно. Экстремально низкий уровень сейсмичности отмечен в районе Кроноцкого залива. На региональном уровне низкая сейсмичность наблюдалась в южной части Камчатки, включая акватории Охотского моря и Тихого океана.

Помимо этого, оценка уровня сейсмичности рассчитана в пространственных областях, определенных в соответствии с регионализацией сейсмоактивного объема Камчатки и прилегающих территорий [7], учитывающей тектоно-географическое положение землетрясений (табл. II.2).

Таблица П.2. Оценка уровня сейсмичности в 2022 г. для различных пространственных областей Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$2.5 \cdot 10^{13}$	0.86 ± 0.04	фоновый повышенный
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$3.0 \cdot 10^{13}$	0.25 ± 0.06	фоновый средний
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$1.1 \cdot 10^{14}$	0.61 ± 0.06	фоновый средний
Корякский сейсмический пояс	$4.6 \cdot 10^{11}$	0.62 ± 0.06	фоновый средний
Командорский сегмент Алеутской дуги	$2.7 \cdot 10^{13}$	0.49 ± 0.06	фоновый средний
Континентальные области Камчатки (мелкофокусные землетрясения)	$9.1 \cdot 10^9$	0.11 ± 0.04	фоновый пониженный
Северные Курилы (мелкофокусные землетрясения)	$2.7 \cdot 10^9$	0.54 ± 0.06	фоновый средний
Залив Шелихова	$6.4 \cdot 10^9$	0.64 ± 0.06	фоновый повышенный
Охотское море (исключая глубокие землетрясения)	$5.0 \cdot 10^{12}$	1	экстремально высокий

Наиболее сильным сейсмическим событием 2022 г. является землетрясение с магнитудой $M_L=6.2$, произошедшее 16 мая восточнее острова Парамушир (50.34°N , 156.55°E) на глубине 89 км (рис. П.15 а), т.е. за пределами Камчатской сейсмоактивной области. Энергия, выделившаяся при этом землетрясении, составляет 86% всей сейсмической энергии 2022 года. Землетрясение сопровождалось слабым афтершоковым процессом.

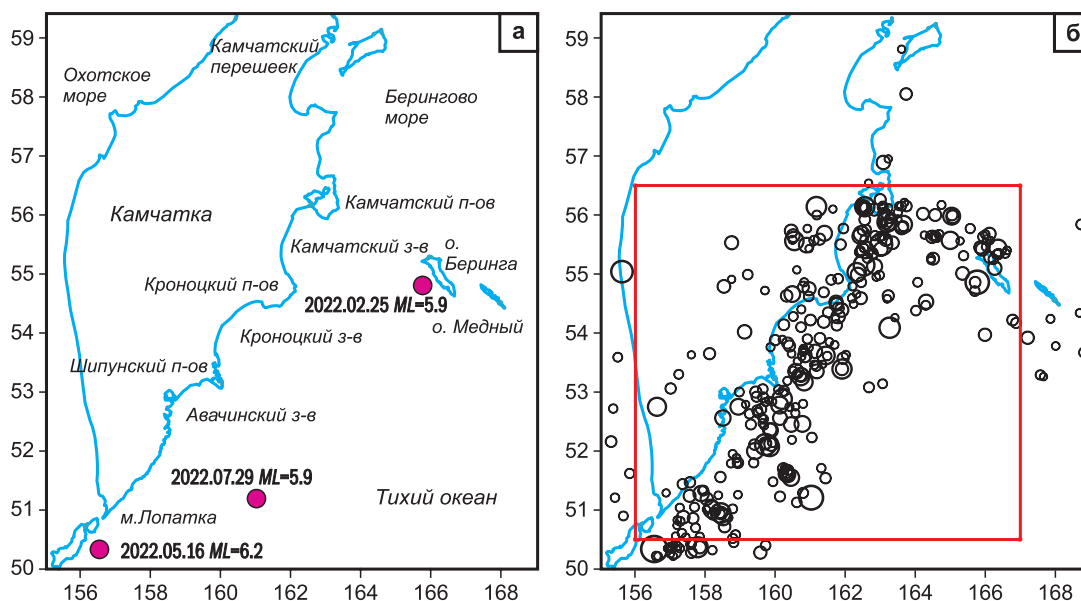


Рис. П.15. Сейсмичность Камчатки в 2022 г.: а – эпицентры землетрясений 25.02.2022 г., 16.05.2022 г., 29.07.2022 г.; б – эпицентры независимых землетрясений с $K_S=9-14$. Красным квадратом отмечена Камчатская сейсмоактивная область

При расчете приведенных ниже параметров сейсмичности использованы каталоги с удаленными афтершоковыми последовательностями и роями. Примененная для этого программа В.Б. Смирнова (МГУ им. М.В. Ломоносова) реализует алгоритм, описанный в [8]. Карта эпицентров независимых землетрясений 2022 г. представлена на рис. П.15 б.

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2022 г. равен 0.472 ± 0.019 , что близко средне-многолетнему значению 0.486 ± 0.002 . Карты наклона графика повторяемости землетрясений γ представлены на рис. П.16. Областью расчета значений является круг радиусом

100 км. Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест. По данным 2020–2022 гг., высокозначимых аномалий не обнаружено, однако наиболее значимое отклонение γ от среднего значения наблюдается в районе Кроноцкого полуострова и Кроноцкого залива, что соответствует зоне с экстремально низким уровнем сейсмичности в 2022 г., отмеченным выше.

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя активность A_{10} в 2022 г. составила 0.288 ± 0.006 при среднемноголетнем значении 0.339 ± 0.001 . В целом активность региона была ниже среднего на ~15%. 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.17. Распределение активности A_{10} в 2022 г. значительно отличается от среднемноголетнего – повышение в разы в районе Камчатского пролива (с захватом Камчатского залива и острова Беринга) и снижение для остальной части.

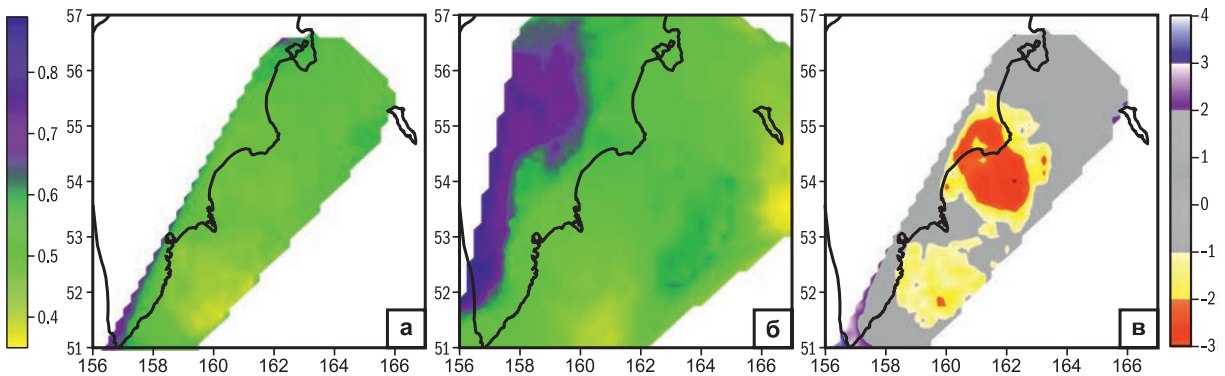


Рис. П.16. Карты наклона графика повторяемости γ , рассчитанные для 2020–2022 гг. (а) и для сравнения – для 1962–2022 гг. (б). Изменение γ в 2020–2022 гг. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение (в)

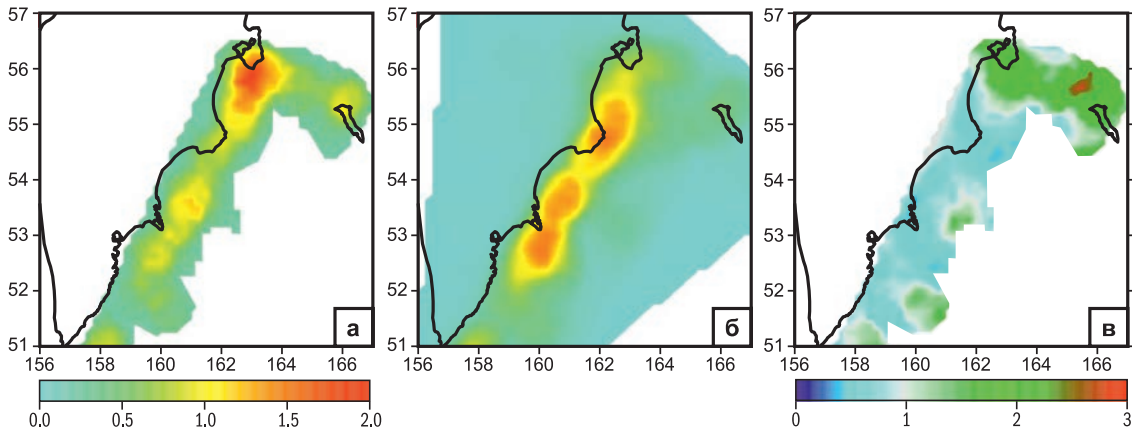


Рис. П.17. Карты сейсмической активности A_{10} в 2022 г. (а) и за период 1962–2022 гг. (б). Активность A_{10} в 2022 г., нормированная на многолетнюю активность (в)

Мониторинг параметра RTL

На рис. П.18 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2022 г. в сейсмоактивной области Камчатки при расчете в диапазоне глубин гипоцентров 0–100 км. Штриховой линией отмечена область надежного определения параметра. Для характерных точек аномалий рассчитан временной ход параметра RTL (рис. П.19). Характерная точка определяется по минимальному значению RTL за время существования аномалии.

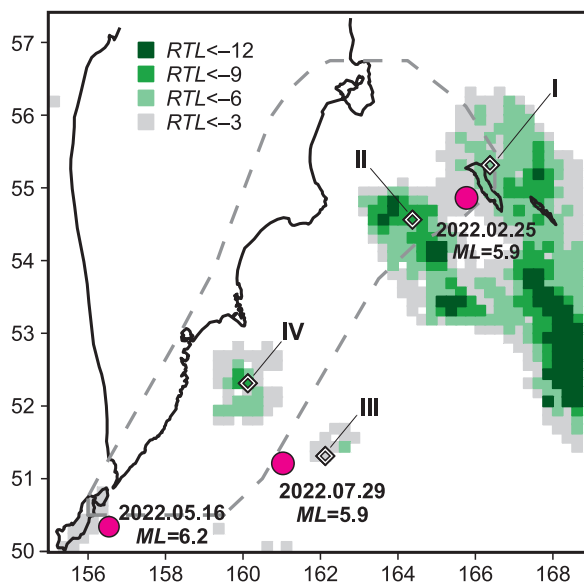


Рис. II.18. Минимальные значения RTL-параметра в 2022 г.

Ромбами обозначены характерные точки аномалий, пунктиром – область надежного определения параметра RTL. Кружками отмечены эпицентры землетрясений 25.02.2022 г., 16.05.2022 г., 29.07.2022 г.

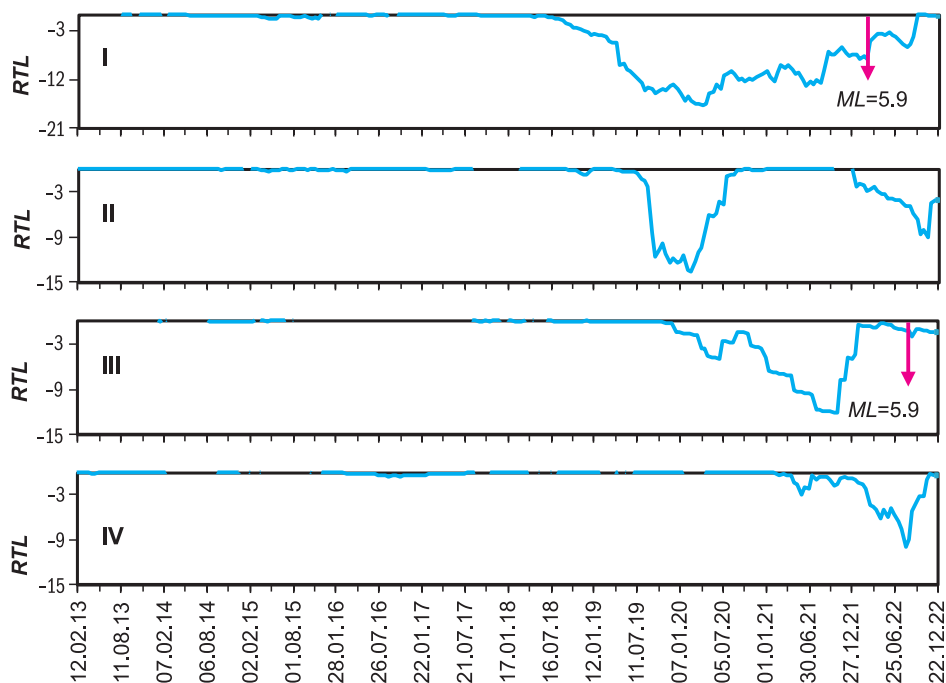


Рис. II.19. Временной ход RTL-параметра в характерных точках аномалий (рис. II.18).

Моменты землетрясений отмечены стрелками

Аномалии в районе острова Беринга (характерные точки I и II) на момент их появления рассматривались как «артефакт» [9], возникший предположительно после удаления афтершоковых последовательностей в районах очагов Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. ($M_w=7.8$) и землетрясения Углового Поднятия 20.12.2018 г. ($M_w=7.3$). Сейсмическая обстановка в данном районе рассмотрена в [10] по ряду параметров, ориентированных на выделение сейсмических затиший и активизаций. Комплексный анализ показал, что сейсмические затишья в районе Командорских островов могут иметь природу, отражающую геодинамическую обстановку, не связанную с «артефактом». По расположению и развитию во времени аномалий затишья и активизаций [10] данные RTL-аномалии могут трассировать «Командорскую брешь». В 2022 г. RTL-аномалия с характерной точкой I (RTL_I) завершилась, по временному и пространственному признаку ее можно сопоставить с землетрясением 25.02.2022 г. с $ML=5.9$ с ошибкой по энергии.

У аномалии RTL_{II} наблюдался второй эпизод развития с расширением зоны затишья в юго-восточном направлении вдоль Алеутского глубоководного желоба.

Аномалия RTL_{IV} впервые проявилась в 2021 г. близ полуострова Шипунский наряду с аномалией RTL_{III} в акватории Тихого океана, в течение 2022 г. наблюдался второй эпизод развития в окрестности Авачинского залива, который в октябре 2022 г. завершился. За это время у глубоководного желоба произошло землетрясение 29.07.2022 г. с $ML=5.9$ спустя шесть месяцев после завершения аномалии RTL_{III} .

Отрицательные значения RTL вдоль острова Парамушир не достигли уровня значимой величины для принятия ее в качестве предвестниковой аномалии. Перед землетрясением 16.05.2022 г. с $ML=6.2$ аномалии не выделено.

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

На рис. П.20 показана карта максимальных значений статистически значимого ($Z>3$) уменьшения скорости сейсмического потока SRD , наблюдавшихся в течение 2022 г. в сейсмоактивной области Камчатки при расчете в диапазоне глубин гипоцентров 0–70 км. Области сейсмических затиший околонуены. Аномалии пронумерованы в хронологическом порядке по мере проявления затишья, рассматриваемого в качестве возможного предвестника сильного землетрясения. Для каждой из аномалий в скользящем временном окне 12 месяцев рассчитан временной ход функции $Z(t)$ (рис. П.21).

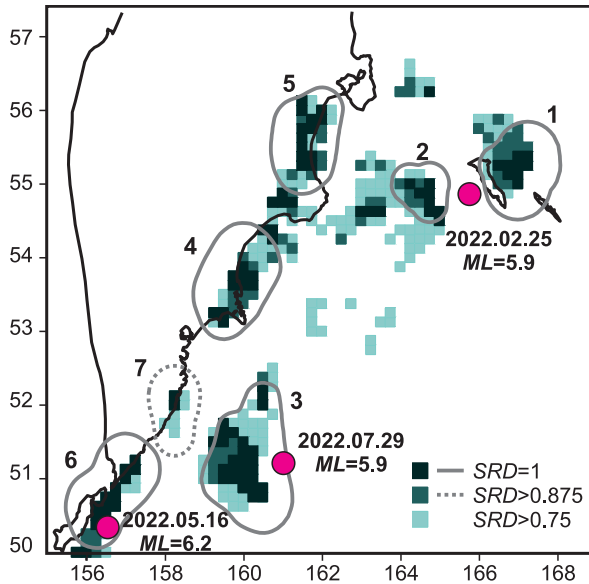


Рис. П.20. Карты максимальных значений SRD в течение 2022 г. Области сейсмического затишья околонуены. Отмечены эпицентры землетрясений 25.02.2022 г., 16.05.2022 г., 29.07.2022 г.

В районе острова Беринга (зона 1) сейсмическое затишье ($SRD=1$) наблюдалось вновь в течение года по сентябрь 2022 года. Здесь затишье наблюдалось с мая 2018 г., уменьшение сейсмичности в 8 раз относительно фоновых значений отмечено с октября 2020 г. по сентябрь 2021 года. Сейсмическое затишье, согласно «Z-функции», подобно RTL -аномалии, в этом районе рассматривалось ранее как «артефакт» [9]. Тем не менее, на его южной периферии зарегистрировано землетрясение 04.04.2020 г. с $ML=6.0$ ($54.67^{\circ}N$, $166.21^{\circ}E$), сопоставленное с предвестниками. Землетрясение 25.02.2022 г. с $ML=5.9$ произошло северо-западнее эпицентра 2020 года.

Аномалия сейсмического затишья в зоне 2, подобно аномалии у острова Беринга в 2022 г., наблюдалась вновь с октября 2021 г., рассматривалась как «артефакт» и завершилась в ноябре 2022 года. Данная аномалия занимает лишь часть участка, охваченного протяженной зоной затишья с аномалиями активизаций на периферии [10].

Абсолютное затишье (отсутствие землетрясений выбранного энергетического диапазона) в зоне 3 наблюдалось в течение 14 месяцев (с мая 2021 г. по июнь 2022 г.) и являлось продолжением развивающейся аномалии с апреля 2020 года. На краю аномалии зарегистрировано землетрясение 29.07.2022 г. с $ML=5.9$.

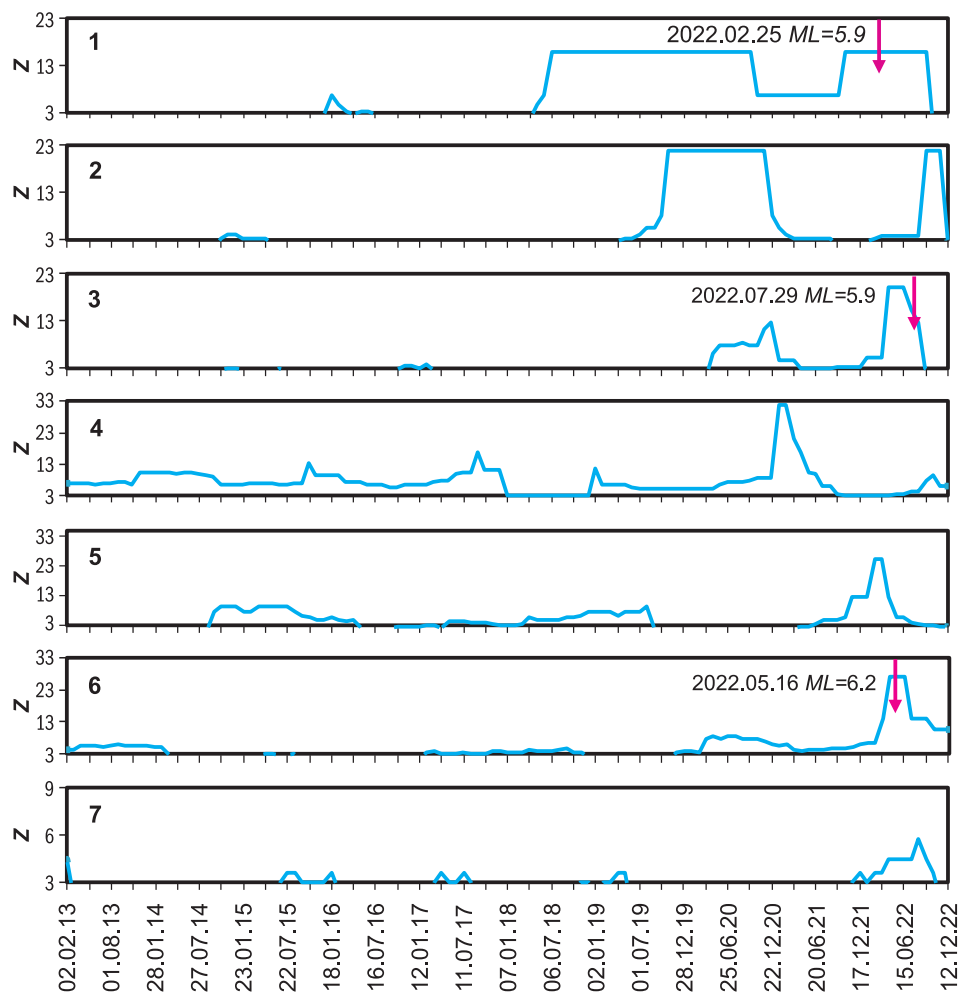


Рис. 11.21. Зависимости $Z(t)$, рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. 11.20). Отмечены моменты землетрясений, сопоставленных аномалиям

В районе полуострова Шипунский (зона 4) аномалия проявлялась эпизодически [11]. Сейсмическое затишье наблюдалось в течение 13 месяцев (с февраля 2020 г. по февраль 2021 г.), уменьшение скорости сейсмического потока в ~ 4 раза ($SRD=0.75$) относительно среднемноголетнего значения в этой зоне отмечалось по ноябрь 2021 года.

На побережье Камчатского залива (зона 5) сейсмическое затишье ($SRD=1$) наблюдалось в течение 13 месяцев – по март 2022 года.

В районе мыса Лопатка (юг Камчатки) и острова Парамушир (зона 6) абсолютное затишье наблюдалось в течение 14 месяцев (по июнь 2022 г.), сейсмическая активность в ~ 9 раз ($SRD=0.89$) меньше среднемноголетнего значения в этой зоне по декабрь 2022 года. Землетрясение 16.05.2022 г. с $ML=6.2$ произошло на фоне развития аномалии сейсмического затишья спустя год после его начала.

В пределах зоны 7 наблюдалось снижение сейсмической активности в 10 раз в течение года по август 2022 г. ($SRD=0.90$).

Заключение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2022 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят уровень сейсмичности по шкале «СОУС'09», активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик RTL - и « Z -функция». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2022 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2022 гг.).

- Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2022 г.:
- уровень сейсмичности Камчатского региона в 2022 г. по шкале «СОУС'09» – фоновый средний;
 - вдоль Алеутского глубоководного желоба (район Командорских островов) наблюдалась протяженная *RTL*-аномалия, завершилась *Z*-аномалия;
 - в районе Авачинского залива завершились *RTL*- и *Z*-аномалии;
 - на юге Камчатки у острова Парамушир завершилась *Z*-аномалия;
 - экстремально низкий уровень сейсмичности наблюдался в районе Кроноцкого полуострова и Кроноцкого залива, где также отмечается уменьшение наклона графика повторяемости;
 - на юге Камчатки отмечены низкий уровень сейсмичности по шкале «СОУС'09» и снижение активности A_{10} ;
 - в Камчатском проливе наблюдаются повышенные в несколько раз (по сравнению со среднемноголетними) значения активности A_{10} при фоновом среднем уровне сейсмичности по шкале «СОУС'09».

Литература

1. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Количественный анализ сейсмичности. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2009 году. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 63–69. – EDN: UAGCRT
2. 2022-ER_App18_Kamchatka-and-Komandor-Islands.xlsx [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2022 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_22.html, свободный.
3. База данных «Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН» [сайт]. – URL: <http://www.emsd.ru/sdis/>. Дата обновления 10.01.2024.
4. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
5. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сенюков С.Л., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 6–27. – EDN: HTUGUH
6. Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. – 2011. – V. 5, N 2. – P. 123–128. – DOI: 10.1134/S0742046311020060. – EDN: OHTIXN
7. 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. – DOI: 10.7868/S0203030613010057. – EDN: PUASZL
8. 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.
9. Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Воропаев П.В., Коновалова А.А. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 89–97. – EDN: GMEAPM
10. Коновалова А.А., Салтыков В.А. Сейсмические предвестники сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Вулканология и сейсмология. – 2023. – № 6. – С. 60–77. – DOI: 10.31857/S0203030623700323. – EDN: AZDSHI
11. Коновалова А.А. Проявление сейсмических аномалий перед сильными землетрясениями Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России [Электронный ресурс]: Труды Седьмой научно-технической конференции / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 227–281. – URL: <https://www.emsd.ru/conf2019lib/pdf/predv/konovalova.pdf>. – EDN: PRRDKC