

Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко, А.А. Коновалова

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2021 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 $56.5^\circ N$, долготой $\lambda=156.0$ и $167.0^\circ E$, 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 2021 г. сейсмическая энергия составила $4.75 \cdot 10^{14}$ Дж при среднегодовом (за десять лет) значении $2.57 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.94 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2021 гг. (рис. П.12). Для 2021 г. значение функции распределения сейсмической энергии составляет 0.77 ± 0.05 , что позволяет рассматривать 2021 г. как год с фоновой средней сейсмичностью.

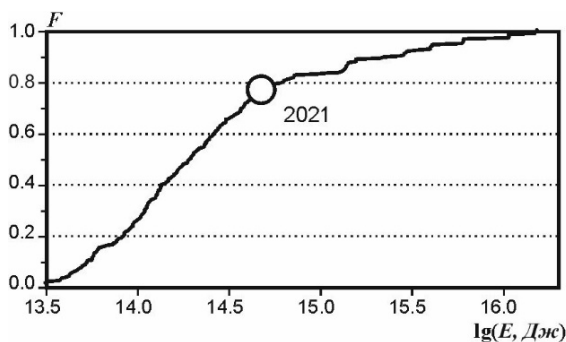


Рис. П.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях в КСО в 1962–2021 гг.

Кружком отмечено значение, соответствующее 2021 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. П.13 отражает изменение оценок уровня сейсмичности КСО в целом в течение 2021 г. в различных временных окнах. Землетрясение 16.03.2021 г. с $M=6.5$ ($ML=6.6$) вызвало повышение регионального уровня сейсмичности до высокого уровня во временных окнах до одного месяца.

Локальные аномалии уровня сейсмичности в 2021 г. показаны на картах уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», полученных при сканировании пространства вертикальными цилиндрами с радиусами 70 и 280 км (рис. П.14).

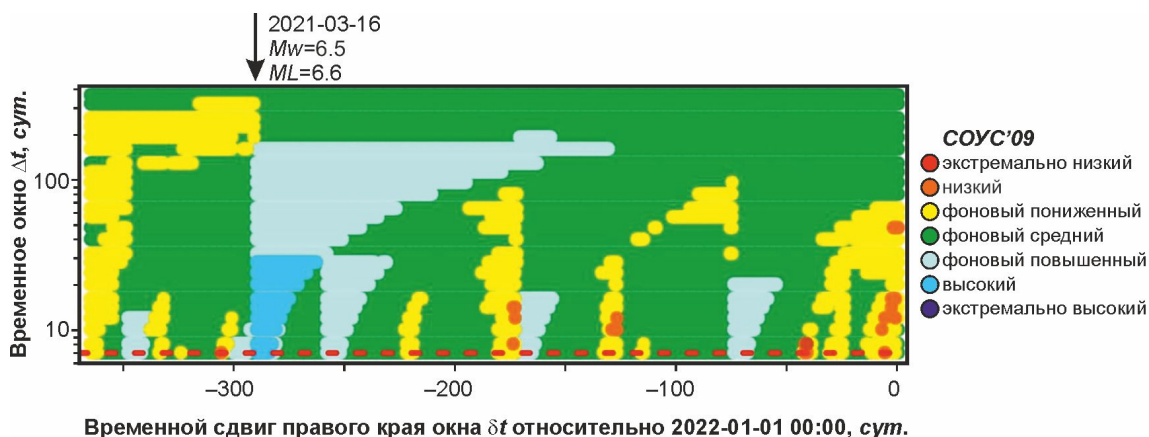


Рис. 11.13. Временной ход уровня сейсмичности КСО в различных временных окнах в 2021 г.

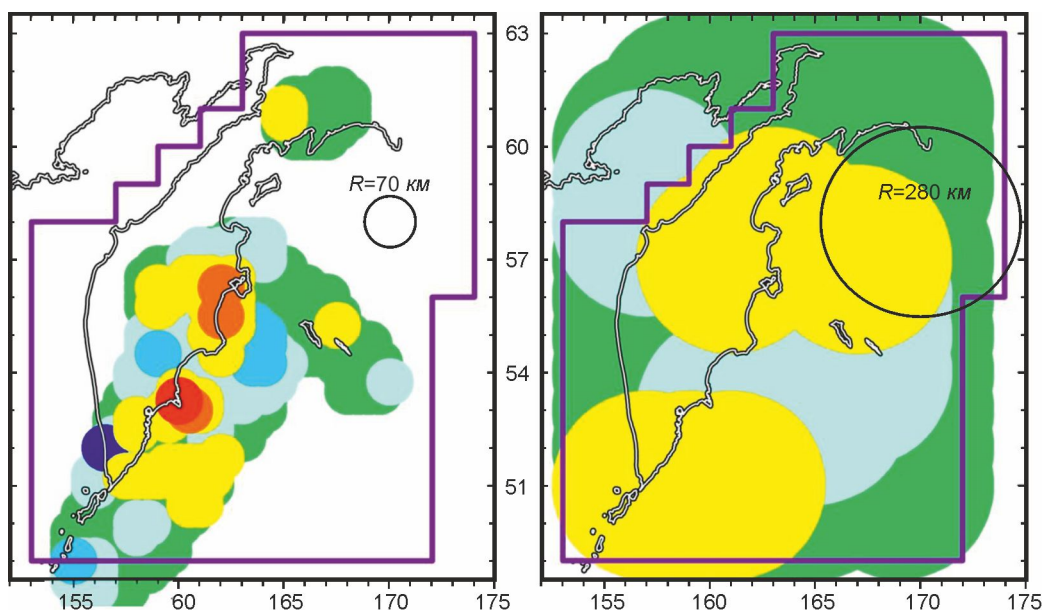


Рис. 11.14. Горизонтальные вариации уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09» масштаба 140 км (слева) и 560 км (справа) в 2021 г.

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

На локальном пространственном масштабе выделяются области низкого уровня сейсмичности в Камчатском заливе и экстремально низкого – в районе мыса Шипунского. На субрегиональном уровне области пониженной фоновой сейсмичности отмечаются в южной части сейсмоактивной зоны Камчатки и в ее северной части с захватом Камчатского залива, Камчатского перешейка и акватории о. Беринга. 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).

Единственным сильным сейсмическим событием 2021 г. является землетрясение с $M=6.5$ ($ML=6.6$), произошедшее 16 марта восточнее Кроноцкого полуострова ($54.67^{\circ}N$, $163.35^{\circ}E$) на глубине 64 км (рис. II.15 а). Энергия, выделившаяся при этом землетрясении и сопутствующих ему афтершоках, составляет 86% всей сейсмической энергии 2021 года.

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 2021 г. представлена на рис. II.15 б.

Таблица П.2. Оценка уровня сейсмичности в 2021 г. для различных пространственных областей Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$1.0 \cdot 10^{12}$	0.41 ± 0.06	фоновый средний
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$1.7 \cdot 10^{13}$	0.11 ± 0.04	фоновый пониженный
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$2.9 \cdot 10^{13}$	0.23 ± 0.06	фоновый средний
Командорский сегмент Алеутской дуги	$9.9 \cdot 10^{12}$	0.30 ± 0.06	фоновый средний
Континентальные области Камчатки (мелкофокусные землетрясения)	$4.2 \cdot 10^{10}$	0.31 ± 0.06	фоновый средний

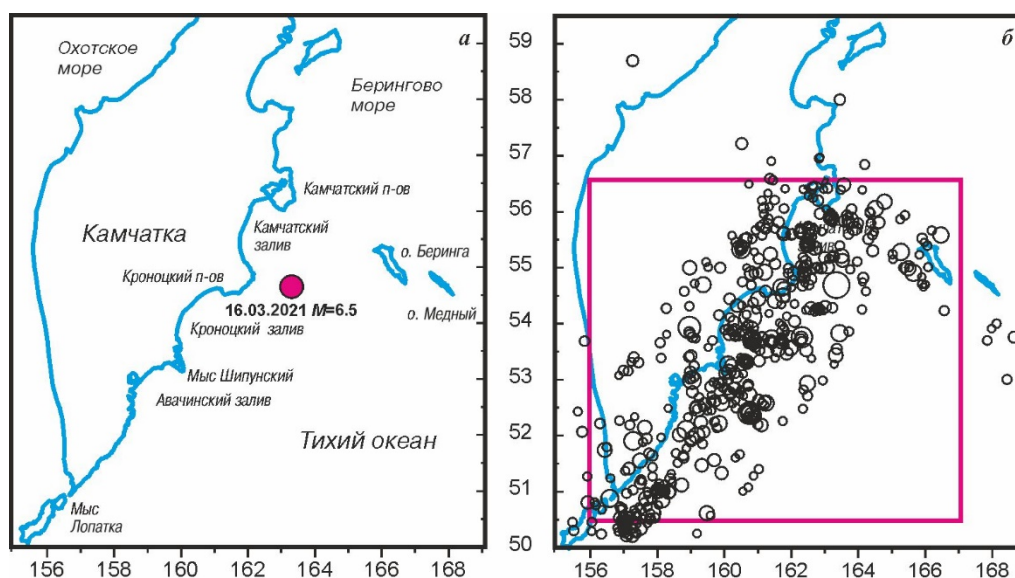


Рис. П.15. Сейсмичность Камчатки в 2021 г.: а – эпицентр землетрясения 16.03.2021 г.; б – эпицентры независимых землетрясений с $K_S=9-14$. Красным квадратом отмечена Камчатская сейсмоактивная область

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2021 г. равен 0.491 ± 0.018 , 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 2019–2021 гг., высокосignificant аномалий не обнаружено.

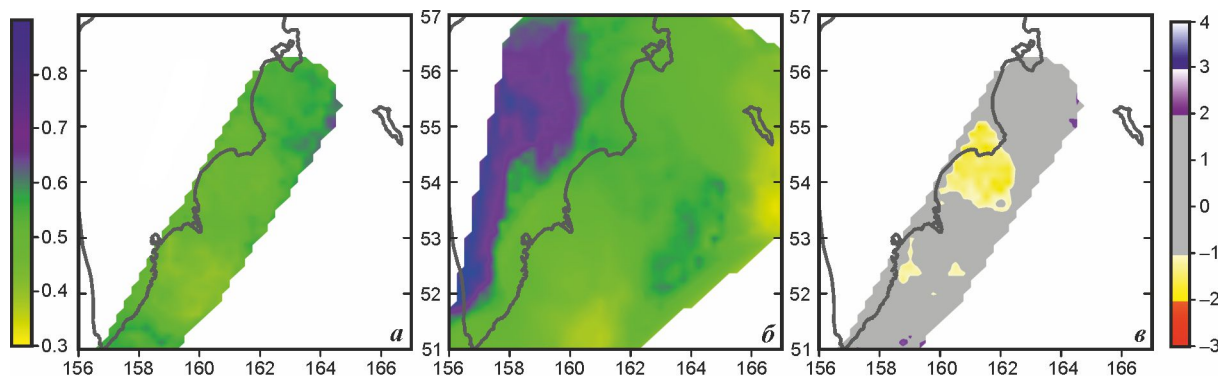


Рис. П.16. Карты наклона графика повторяемости γ , рассчитанные для 2019–2021 гг. (а), и для сравнения – для 1962–2021 г. (б). Изменение γ в 2019–2021 г. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение (в)

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя активность A_{10} в 2021 г. составила 0.317 ± 0.007 при среднемноголетнем значении 0.340 ± 0.001 . В целом активность региона была ниже среднего на $\sim 7\%$. 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. II.17. Распределение активности A_{10} в 2021 г. значительно отличается от среднемноголетнего: при соответствии пространственного положения максимумов отмечается снижение в разы активности в полосе между желобом и побережьем Камчатки.

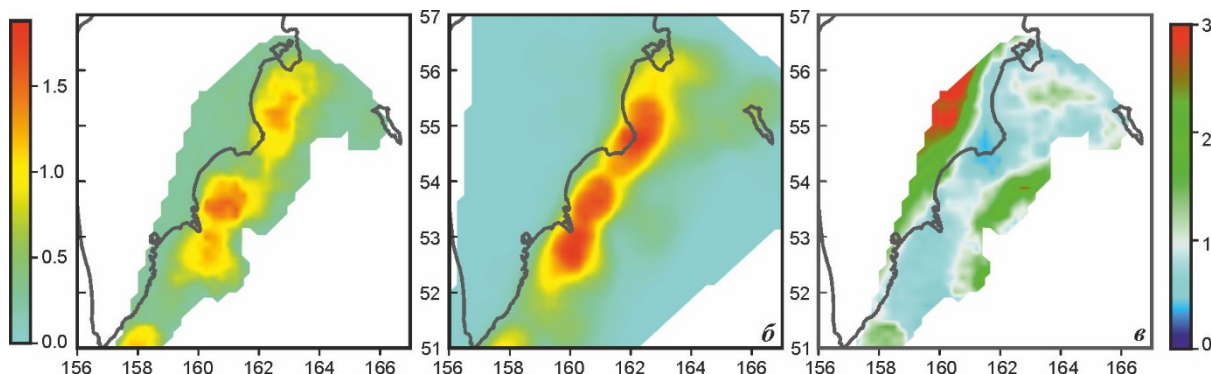


Рис. II.17. Карты сейсмической активности A_{10} в 2021 г. (а) и 1962–2021 гг. (б). Активность A_{10} в 2021 г., нормированная на многолетнюю активность (в)

Мониторинг параметра RTL

На рис. II.18 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2021 г. в сейсмоактивной области Камчатки при расчете в диапазоне глубин гипоцентров 0–100 км. Штриховой линией отмечена область надежного определения параметра RTL . Для характерных точек аномалий рассчитан временной ход параметра RTL (рис. II.19). Характерная точка определяется по минимальному значению RTL за время существования аномалии.

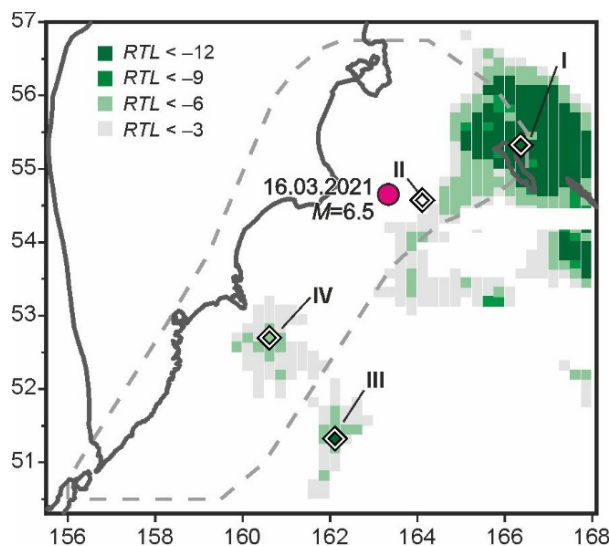


Рис. II.18. Минимальные значения RTL -параметра в 2021 г.

Ромбами обозначены характерные точки аномалий, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

В 2017–2018 гг. на Алеутском участке зоны стыка Курило-Камчатской и Алеутской дуг наблюдалась сейсмическая активизация: произошли сильные землетрясения 17.07.2017 г. ($M_w=7.8$) и 20.12.2018 г. ($M_L=7.3$), сопровождавшиеся значительными афтершоковыми последовательностями. Удаление из каталога землетрясений, идентифицируемых как афтершоки, создает артефактные зоны затишья, что следует учитывать при анализе.

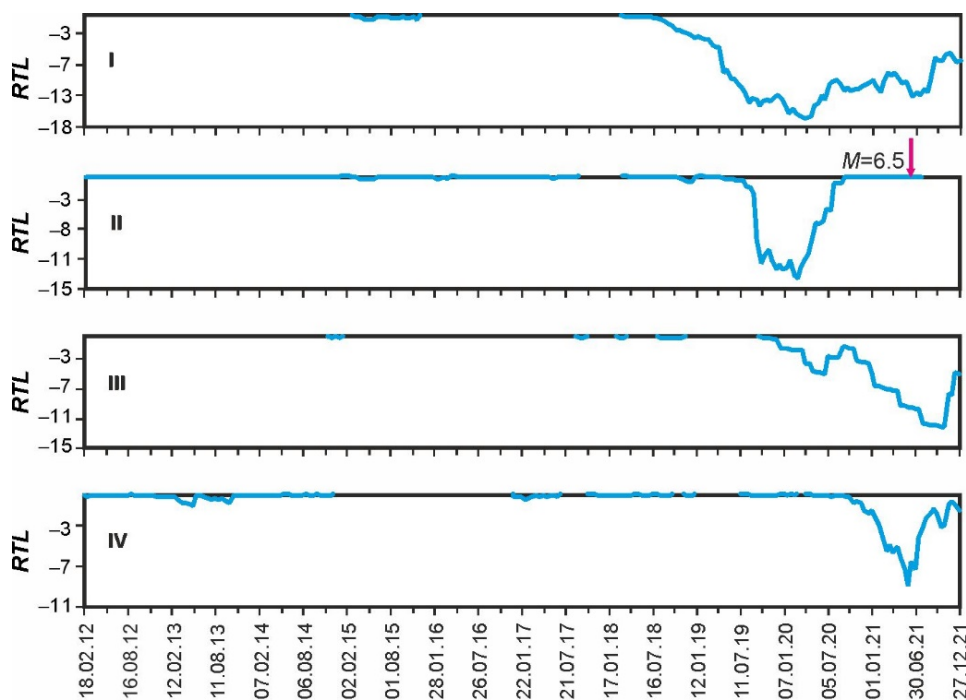


Рис. 11.19. Временной ход RTL -параметра в характерных точках аномалий (рис. 11.18)

Аномалия в районе о. Беринга (характерная точка I) проявилась в августе 2017 г. и обусловлена удалением из каталога афтершоков землетрясения с $M_w=7.8$, произошедшего 17.07.2017 г. восточнее о. Медный (54.35°N , 168.9°E).

Аномалия RTL с характерной точкой II в акватории Тихого океана расположена в районе очага землетрясения 20.12.2018 г. $M_w=7.3$ (54.91°N , 164.71°E) и в большей мере также обусловлена удалением из каталога афтершоков этого землетрясения. Аномалию II можно рассматривать как предваряющую землетрясение 16.03.2021 г. с $M=6.5$ ($ML=6.6$). Землетрясение произошло в пределах аномалии спустя восемь месяцев после выхода параметра RTL на фоновые значения. Вероятно, произошло наложение артефакта и «природного» затишья.

Аномалия III лежит вне области надежного определения параметра RTL . Тем не менее, длительность аномалии (более года) и достижимый минимум RTL (<-12) позволяют рассматривать ее как возможный предвестник сильного землетрясения.

Аномалия IV характеризуется длительностью десять месяцев и минимальными значениями $RTL < 9$.

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

На рис. 11.20 показана карта максимальных значений статистически значимого ($Z > 3$) уменьшения скорости сейсмического потока SRD , наблюдавшихся в течение 2021 года. Области сейсмических затиший оконтурены. 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. 11.21).

В районе о. Беринга (зона 1) сейсмическое затишье ($SRD \geq 0.875$) наблюдалось в течение почти 2.5 лет с августа 2017 г. по декабрь 2019 г. и, так же, как и аномалия RTL , вероятно, обусловлено удалением афтершоков землетрясения 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$.

Абсолютное затишье (отсутствие землетрясений выбранного энергетического диапазона) в зоне 2 наблюдалось в течение 13 месяцев с октября 2018 г. по октябрь 2019 года.

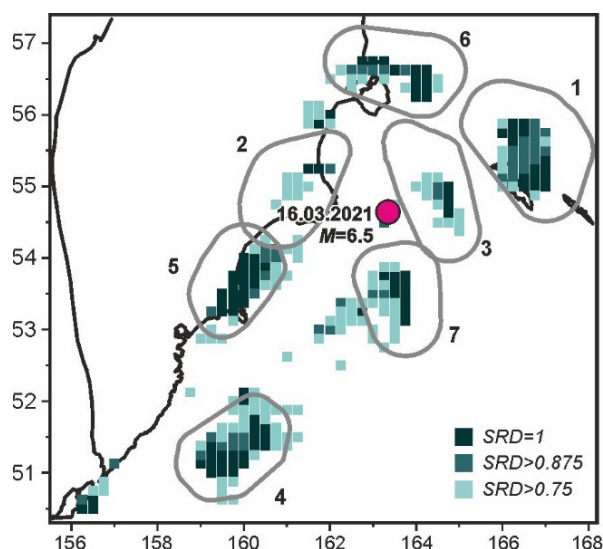


Рис. П.20. Карты максимальных значений SRD в течение 2021 г. Области сейсмического затишья околтурены. Отмечен эпицентр землетрясения 16.03.2021 г. ($M_L=6.6$)

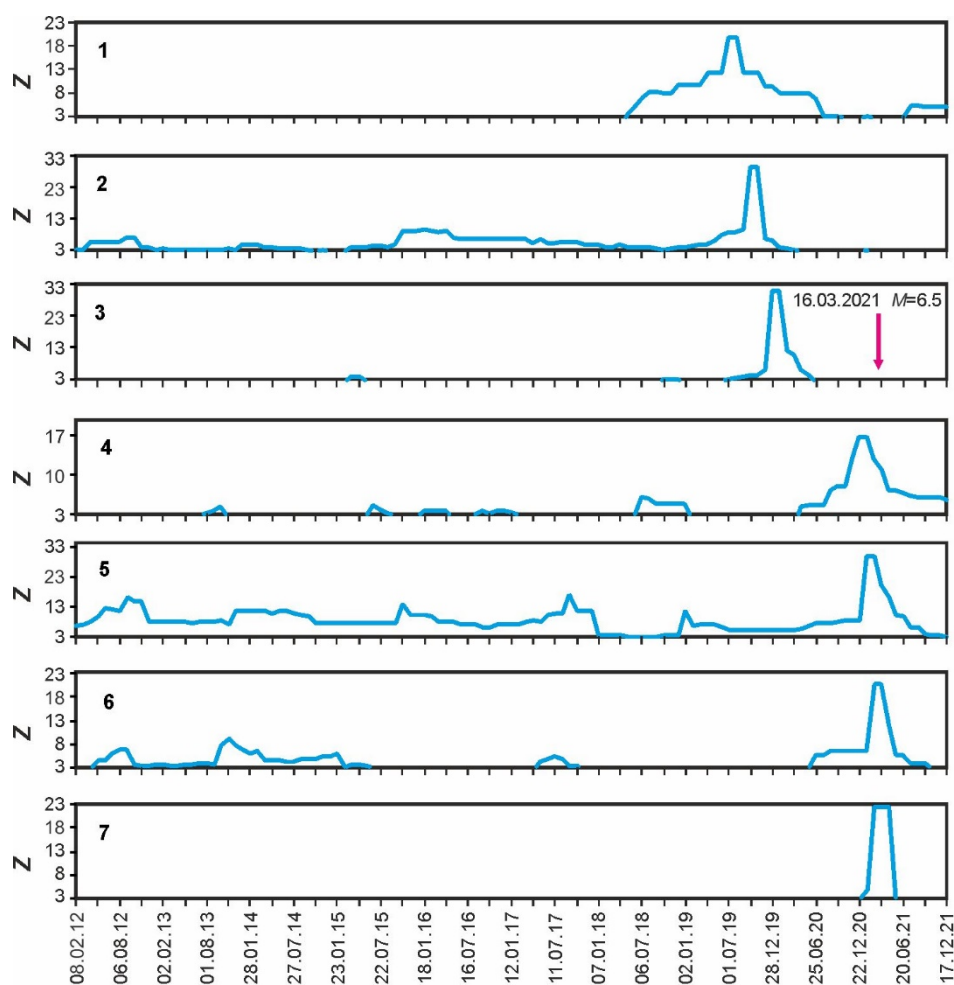


Рис. П.21. Зависимости $Z(t)$, рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. П.20). Отмечен момент землетрясения 16.03.2021 г. ($M_L=6.6$)

Аномалия сейсмического затишья в зоне 3, по-видимому, определена удалением из каталога афтершоков землетрясения 20.12.2018 г. ($M_w=7.3$). По положению эпицентра (на краю аномалии) и по времени упреждения в один год (интервал времени, отсчитываемый от окончания затишья до момента землетрясения) аномалия может рассматриваться как предвещающая землетрясение 16.03.2021 г. с $M=6.5$ ($M_L=6.6$).

В зонах 4–7 сейсмическое затишье наблюдалось на протяжении не менее года.

Заключение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2021 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 2021 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2021 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2021 г.:

- уровень сейсмичности Камчатского региона в 2021 г. по шкале «СОУС'09» – фоновый средний;
 - на севере Камчатской сейсмоактивной области отмечены пониженный фоновый уровень сейсмичности (в Камчатском заливе – низкий) и снижение активности A_{10} . Здесь же завершились *Z*- и *RTL*-аномалии;
 - экстремально низкий уровень сейсмичности наблюдался в районе мыса Шипунский, где также завершились *Z*- и *RTL*-аномалии;
 - на юге Камчатки наблюдались *Z*- и *RTL*-аномалии, отмечены пониженный фоновый уровень сейсмичности по шкале «СОУС'09» и снижение активности A_{10} .

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. 2021-ER_App17_Kamchatka-and-Komandor-Islands.xls [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2021 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_21.html, свободный.
3. База данных «Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН» [сайт]. – URL: <http://www.emsd.ru/sdis/> (дата обновления 01.11.2022).
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., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 6–27. – EDN: HTUGUH
6. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59. – EDN: NSYPHR
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.