

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 2020 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 2020 г. сейсмическая энергия составила $4.66 \cdot 10^{14}$ Дж при среднегодовом (за 59 лет) значении $1.0 \cdot 10^{15}$ Дж и медианном годовом значении $2.0 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2020 гг. (рис. П.12). Для 2020 г. значение функции распределения сейсмической энергии составляет 0.76 ± 0.06 , что позволяет рассматривать 2020 г. как год с фоновой средней сейсмичностью.

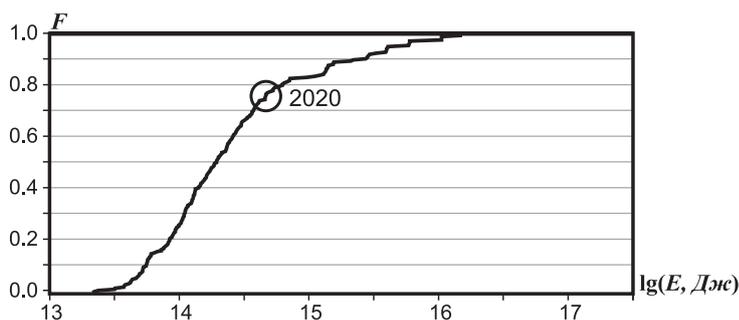


Рис. П.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях в КСО в 1962–2020 гг.

Кружком отмечено значение, соответствующее 2020 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 2020 г. в различных временных окнах. Землетрясения с $ML \geq 6$ вызвали повышение регионального уровня сейсмичности до высокого и фонового повышенного. Отмечается снижение уровня сейсмичности до экстремально низкого во временных окнах от 5 до 15 суток перед землетрясением 20.02.2020 года.

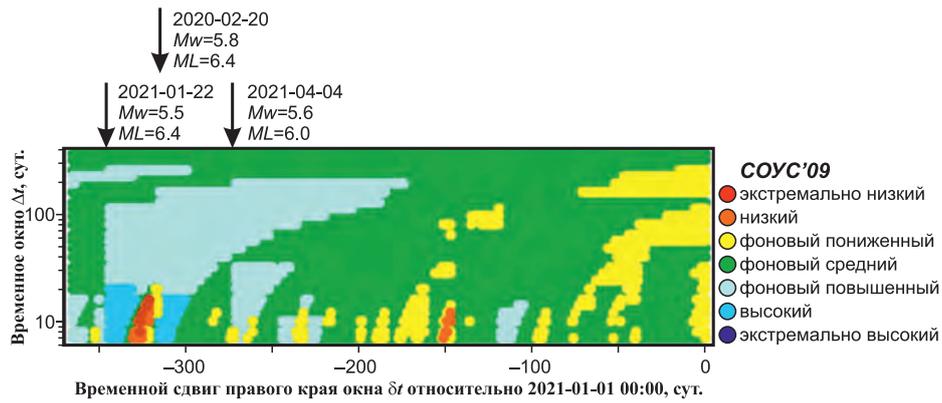


Рис. 11.13. Временной ход уровня сейсмичности КСО в различных временных окнах в 2020 г.

Локальные аномалии уровня сейсмичности в 2020 г. показаны на карте уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», полученной при сканировании пространства вертикальными цилиндрами с радиусом 100 км (рис. 11.14). Выделяются области экстремально высокого уровня сейсмичности на юге Камчатки, южнее о. Беринга и в Центральной Камчатке, связываемые с наиболее сильными землетрясениями 2020 г., и экстремально низкого – восточнее Шипунского полуострова.

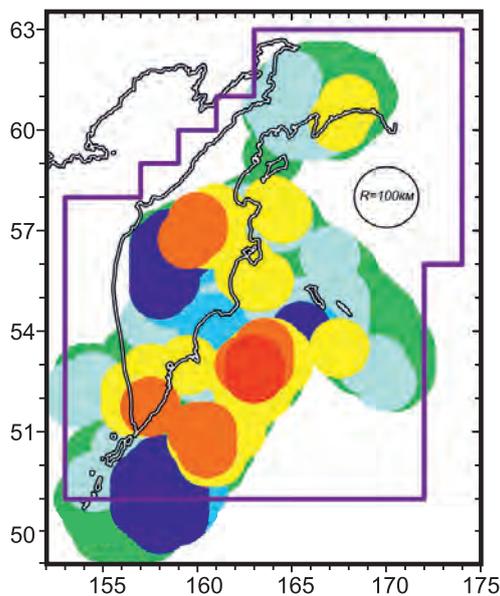


Рис. 11.14. Поверхностные вариации уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09» масштаба 200 км в 2020 г.

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

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. 11.2).

Таблица 11.2. Оценка уровня сейсмичности в 2020 г. для различных пространственных областей Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$6.3 \cdot 10^{16}$	1.00 ± 0.00	экстремально высокий
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$6.8 \cdot 10^{14}$	0.87 ± 0.04	фоновый повышенный
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$8.3 \cdot 10^{13}$	0.58 ± 0.06	фоновый средний
Командорский сегмент Алеутской дуги	$3.9 \cdot 10^{13}$	0.56 ± 0.07	фоновый средний
Континентальные области Камчатки (мелкофокусные землетрясения)	$3.8 \cdot 10^9$	0.04 ± 0.02	фоновый пониженный

Наиболее сильными сейсмическими событиями 2020 г. являются: землетрясение 21 января с $ML=6.4$ на восточном побережье Кроноцкого полуострова, землетрясение 20 февраля с $ML=6.4$ на юге Кроноцкого залива и землетрясение 4 апреля с $ML=6.0$ в южной акватории острова Беринга (рис. П.15 а). Параметры землетрясений приведены в табл. П.3.

Таблица П.3. Землетрясения с $ML \geq 6$, произошедшие в КСО в 2020 г.

Дата дд.мм.гггг	Время	K_S	M	M_w	ML	φ , °N	λ , °E	h , км	Район
22.01.2020	11:04:11	14.3	5.5	5.5	6.4	54.74	161.85	83	Кроноцкий п-ов
20.02.2020	18:57:34	14.3	5.8	5.8	6.4	53.44	160.92	52	Кроноцкий залив
04.04.2020	06:18:22	13.4	5.6	5.6	6.0	54.67	166.21	37	Южнее о. Беринга

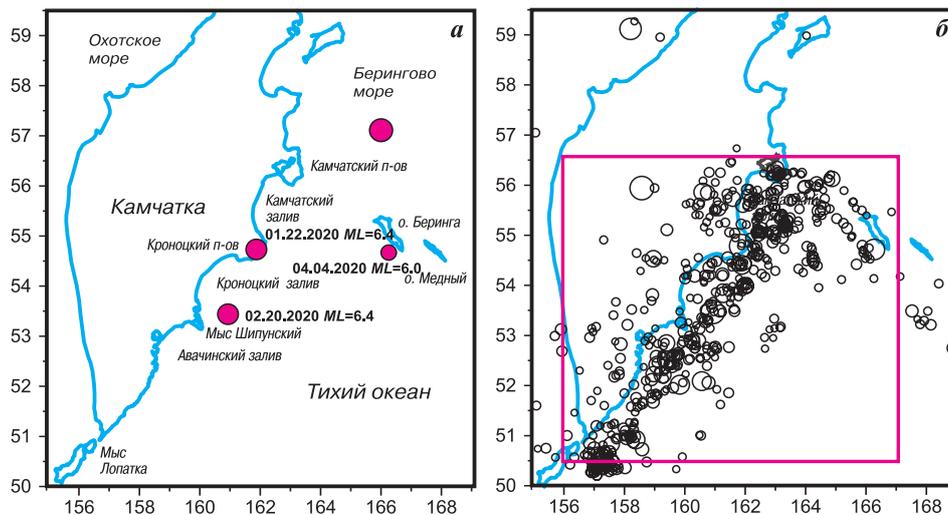


Рис. П.15. Сейсмичность Камчатки в 2020 г.: а – эпицентры сильных землетрясений с $ML \geq 6$; б – эпицентры независимых землетрясений с $K_S=9-14$. Красным квадратом отмечена Камчатская сейсмоактивная область

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 2020 г. представлена на рис. П.15 б.

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2020 г. равен 0.54 ± 0.02 , что близко к средне-многолетнему значению 0.501 ± 0.003 . 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 2018–2020 гг., высокосignificant аномалий не обнаружено. Статистическая достоверность уменьшения γ в районе Кроноцкого залива – на уровне $\alpha=0.05$.

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя активность A_{10} в 2020 г. составила 0.222 ± 0.007 при среднемноголетнем значении 0.273 ± 0.001 . В целом активность региона была ниже среднего на $\approx 19\%$. 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 2020 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Кроноцкого п-ова, мыса Шипунского, Авачинского и Кроноцкого заливов. Активность превысила средние значения в Камчатском заливе и Камчатском проливе.

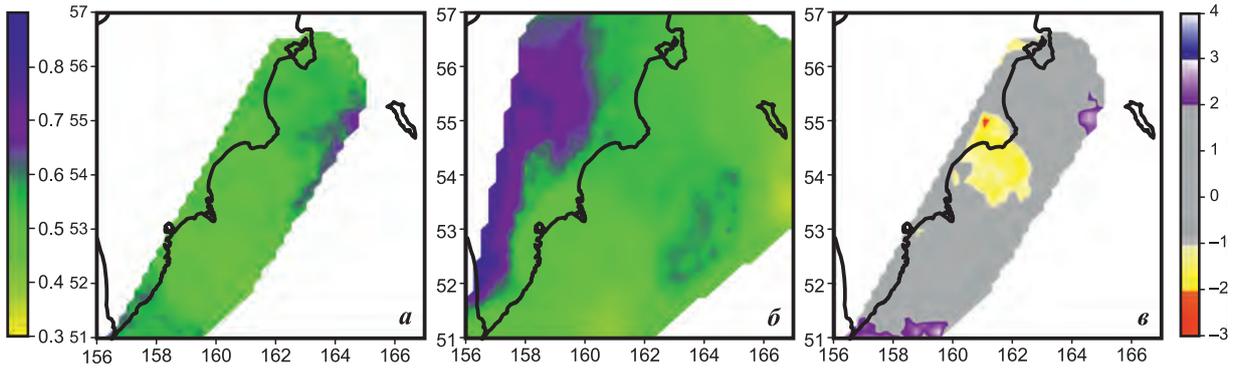


Рис. II.16. Карты наклона графика повторяемости γ , рассчитанные для 2018–2020 гг. (а) и для сравнения – для 1962–2020 гг. (б). Изменение γ в 2018–2020 гг. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение (в)

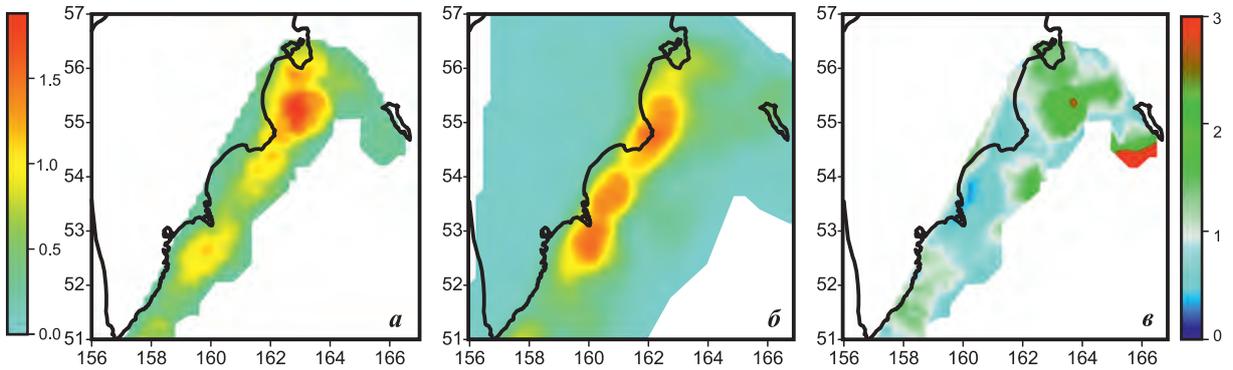


Рис. II.17. Карты сейсмической активности A_{10} в 2020 г. (а) и 1962–2020 гг. (б). Активность A_{10} в 2020 г., нормированная на многолетнюю активность (в)

Мониторинг параметра RTL

На рис. II.18 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2020 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.

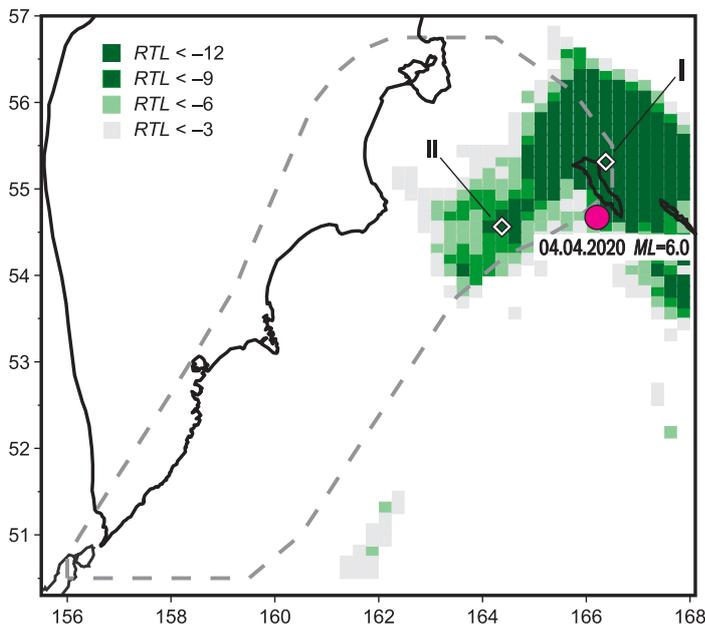


Рис. II.18. Минимальные значения RTL -параметра в 2020 г. Ромбами обозначены характерные точки аномалий, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

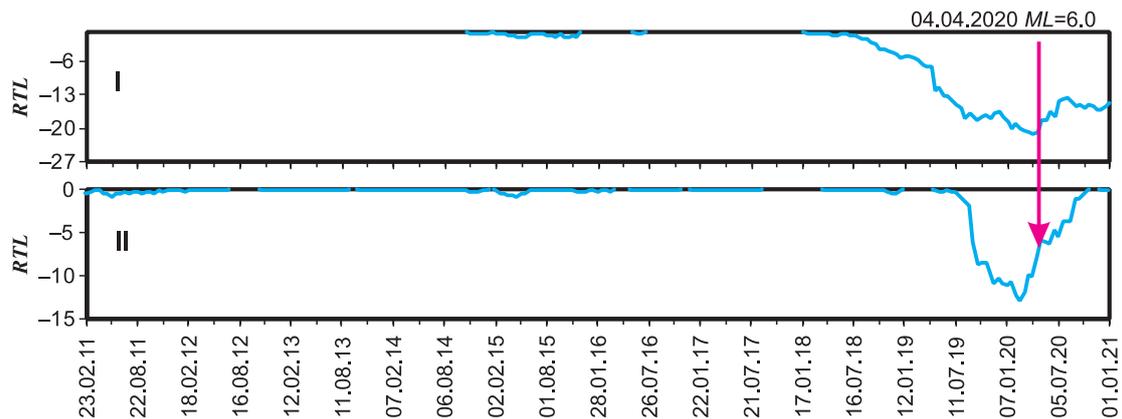


Рис. II.19. Временной ход RTL -параметра в характерных точках аномалий (рис. II.18)

Аномалии обусловлены удалением из каталога афтершоков Ближне-Алеутского землетрясения (17.07.2017 г.) и землетрясения Углового поднятия (20.12.2018 г.). Тем не менее, по положению эпицентра (на краю аномалии) и по времени упреждения (интервал времени, отсчитываемый от начала выхода параметра RTL из минимума до момента землетрясения) обе аномалии могут быть рассмотрены как предваряющие землетрясение 4 апреля 2020 года. Вероятно, произошло наложение артефакта и «природного» затишья.

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

На рис. II.20 показана карта максимальных значений статистически значимого ($Z > 3$) уменьшения скорости сейсмического потока SRD , наблюдавшихся в течение 2020 года. Области сейсмических затиший околонуены. Отмечены эпицентры землетрясений, сопоставленных с предваряющими их аномалиям. Аномалии пронумерованы в хронологическом порядке по мере проявления затишья, рассматриваемого в качестве возможного предвестника сильного землетрясения. Для каждой из выделенных зон в скользящем временном окне 12 месяцев рассчитан временной ход функции $Z(t)$ (рис. II.21). Стрелками отмечены моменты соответствующих землетрясений.

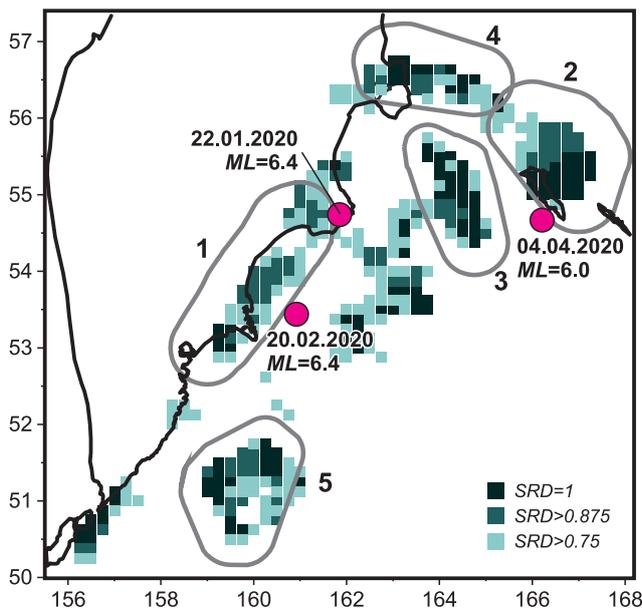


Рис. II.20. Карты максимальных значений SRD в течение 2020 г. Области сейсмического затишья околонуены. Отмечены эпицентры землетрясений с $ML \geq 6$

В зоне 1 уменьшение скорости сейсмического потока в 8 раз отмечалось в течение полутора лет с октября 2016 г. по март 2018 года. Согласно методике, аномалия может рассматриваться как предвестниковая для землетрясений 22.01.2020 г. с $M=5.5$ ($ML=6.4$) и 20.02.2020 г. с $M=5.8$ ($ML=6.4$).

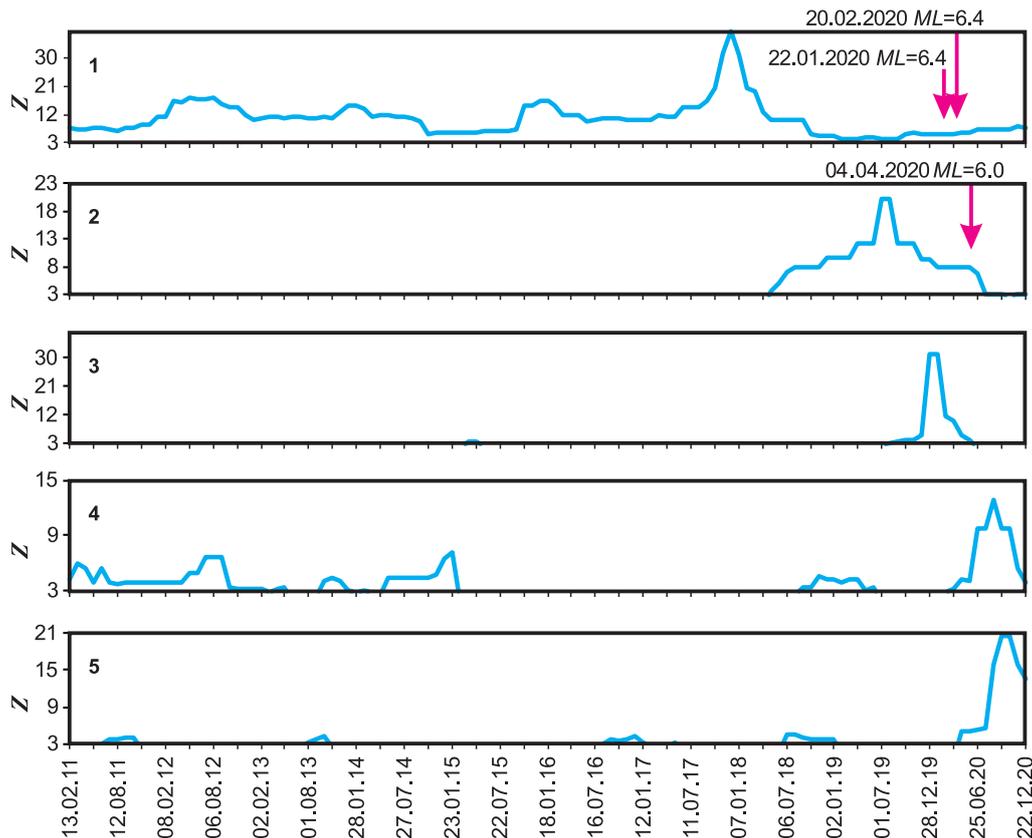


Рис. П.21. Зависимости $Z(t)$, рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. П.20).
Стрелками отмечены моменты землетрясений, сопоставленных соответствующим аномалиям

Аномалия в зоне 2 является следствием удаления афтершоков землетрясения 17.07.2017 года. Однако положение землетрясения 04.04.2020 г. с $M=5.6$ ($ML=6.0$) и время между окончанием затишья и землетрясением (четыре месяца) позволяют рассматривать это затишье также как предвестниковое.

Затишья в зонах 3 и 4 вероятно обусловлены удалением афтершоков землетрясения 20.12.2018 г. и дуплета 25–26.06.2019 г. соответственно.

В зоне 5 сейсмическое затишье наблюдалось в течение 13 месяцев с октября 2019 г. по октябрь 2020 года.

Заключение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2020 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик RTL и « Z -функция». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2020 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2020 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2020 г.:

- уровень сейсмичности Камчатского региона в 2020 г. по шкале «СОУС'09» – фоновый средний;
- на севере сейсмоактивной зоны в районе Камчатского залива и острова Беринга наблюдается повышение активности A_{10} , завершились Z - и RTL -аномалии;
- в районе Кроноцкого полуострова и Кроноцкого залива отмечаются пониженные значения активности A_{10} и наклона графика повторяемости γ , восточнее Кроноцкого залива выделяется область экстремально низкого уровня сейсмичности;
- на юге Камчатки наблюдалась Z -аномалия, выделяется область экстремально высокого уровня 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. 58–62.
2. *2020-ER_App17_Kamchatka-and-Komandor-Islands.xls* [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2020 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_20.html, свободный.
3. *База данных «Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН»* [сайт]. – URL: <http://www.emsd.ru/sdis/> (дата обновления 01.11.2021).
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.
6. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
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.
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.