

## Количественный анализ сейсмичности Камчатки

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

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

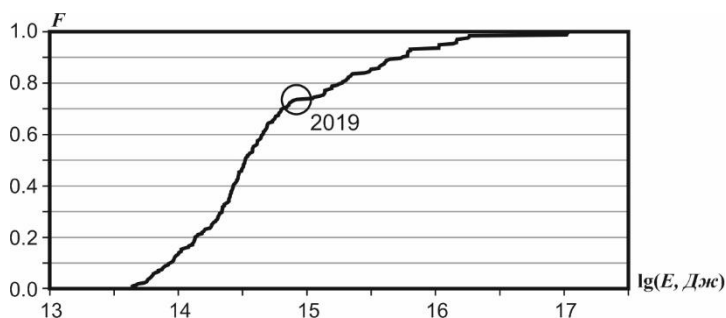
### Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2019 году. Рассматриваются такие параметры как общая выделившаяся сейсмическая энергия, оценка уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», активность  $A_{10}$ , наклон графика повторяемости  $\gamma$ , параметры методик *RTL* и «*Z*-функция». Методики расчета этих параметров описаны в ежегоднике [1]. При расчетах использованы камчатские региональные каталоги [2, 3]. Оценка сейсмической энергии и уровня сейсмичности получены для всей зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, а остальных параметров – для Камчатской сейсмоактивной области (КСО) – района, ограниченного широтой  $\varphi=50.5$  и  $56.5^\circ\text{N}$ , долготой  $\lambda=156.0$  и  $167.0^\circ\text{E}$ , 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

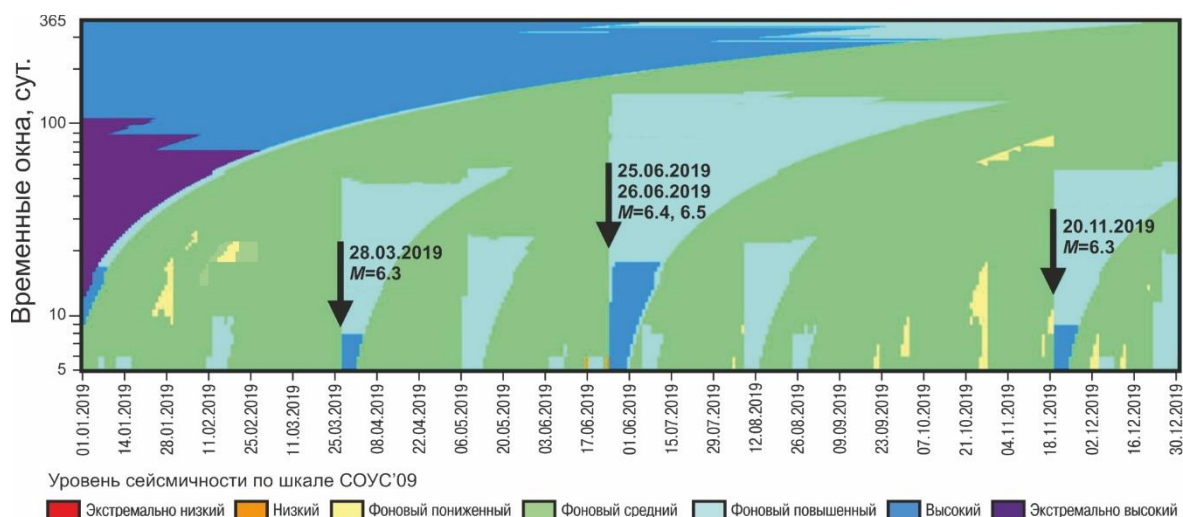
#### Энергия землетрясений Камчатки

Общая выделившаяся в 2019 г. сейсмическая энергия составила  $8.28 \cdot 10^{14}$  Дж при среднегодовом (за 58 лет) значении  $3.42 \cdot 10^{15}$  Дж и медианном годовом значении  $3.3 \cdot 10^{14}$  Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2019 гг. (рис. П.12). Для 2019 г. значение функции распределения сейсмической энергии составляет  $0.73 \pm 0.06$ , что позволяет рассматривать 2019 г. как год с фоновой средней сейсмичностью.



*Рис. П.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в 1962–2019 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2019 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 Камчатки в течение 2019 г. в различных временных окнах. В 2019 г. в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН произошло четыре землетрясения, вызвавших повышение сейсмичности до высокого уровня. Параметры землетрясений приведены в табл. П.2. Сильнейшими были землетрясения-дуплет 25.06.2019 г. с  $ML=6.4$  и 26.06.2019 г. с  $ML=6.5$ , которые вызвали повышение сейсмичности до высокого уровня во временных окнах 5–18 суток. Значительных снижений уровня сейсмичности не наблюдалось.



**Рис. П.13. Временной ход уровня сейсмичности в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в различных временных окнах в 2019 г.**

**Таблица П.2. Землетрясения Камчатки в 2019 г., вызвавшие повышение сейсмичности до высокого уровня**

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	$K_s$	$M$	$ML$	$\varphi$ , °N	$\lambda$ , °E	$h$ , км	Район
28.03.2019	22:06:48	14.0	6.3	6.3	50.51	160.07	49	Восточная акватория юга Камчатки
25.06.2019	09:05:39	14.3	6.5	6.4	56.18	164.41	56	Восточнее Камчатского п-ова
26.06.2019	02:18:06	14.4	6.5	6.5	56.14	164.36	52	
20.11.2019	08:26:05	14.0	6.3	6.3	53.07	153.97	497	Охотское море

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. В табл. П.3 приведены оценки для шести (где возможны статистические оценки) из десяти выделенных зон и для четырех подрегионов Камчатки, определяемых географическим положением.

**Таблица П.3. Оценка уровня сейсмичности в 2019 г. для различных пространственных областей сейсмоактивной зоны Камчатки**

Пространственная область	Энергия $E$ , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$1.1 \cdot 10^{14}$	$0.97 \pm 0.02$	фоновый повышенный
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$5.3 \cdot 10^{13}$	$0.40 \pm 0.06$	фоновый средний
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$1.5 \cdot 10^{14}$	$0.71 \pm 0.06$	фоновый средний
Корякский сейсмический пояс	$6.6 \cdot 10^{10}$	$0.01 \pm 0.01$	низкий
Командорский сегмент Алеутской дуги	$4.8 \cdot 10^{14}$	$0.94 \pm 0.03$	фоновый повышенный
Континентальные области Камчатки (мелкофокусные землетрясения)	$1.1 \cdot 10^{11}$	$0.18 \pm 0.05$	фоновый средний
Камчатский залив	$3.8 \cdot 10^{13}$	$0.76 \pm 0.06$	фоновый средний
Кроноцкий залив	$9.3 \cdot 10^{12}$	$0.40 \pm 0.06$	фоновый средний
Авачинский залив	$8.9 \cdot 10^{12}$	$0.45 \pm 0.07$	фоновый средний
Юг Камчатки (от мыса Лопатка до Авачинского залива)	$2.6 \cdot 10^{12}$	$0.31 \pm 0.06$	фоновый средний

Наиболее сильными сейсмическими событиями КСО в 2019 г. являются два землетрясения, произошедшие в восточной акватории Камчатского полуострова 25 и 26 июня с магнитудами  $M=6.5$  ( $ML=6.4$  и  $6.5$ ), и землетрясение 28 марта с  $M$  ( $ML$ )= $6.3$  на юге сейсмоактивной области Камчатки (рис. П.14 а).

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 2019 г. представлена на рис. П.14 б.

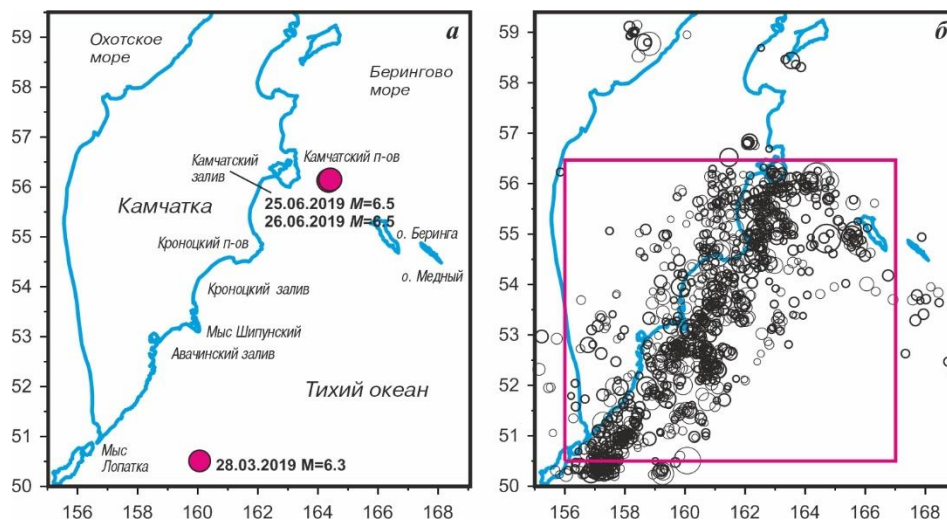


Рис. П.14. Сейсмичность Камчатки в 2019 г.: а – эпицентры сильных землетрясений с  $M \geq 6$ ; б – эпицентры независимых землетрясений с  $K_s = 9-14$ . Красным квадратом отмечена наиболее сейсмоактивная зона

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

Наклон графика повторяемости  $\gamma$  в 2019 г. равен  $0.47 \pm 0.02$ , что близко среднемноголетнему значению  $0.500 \pm 0.003$ . Карты наклона графика повторяемости землетрясений  $\gamma$  представлены на рис. П.15. Областью расчета значений является круг радиусом 100 км. Для выявления статистически значимых изменений  $\gamma$  применен Z-тест. Статистическая достоверность уменьшения  $\gamma$  в районе Кроноцкого залива и Камчатского полуострова, и увеличения на юге Камчатки – на уровне  $\alpha = 0.05$ .

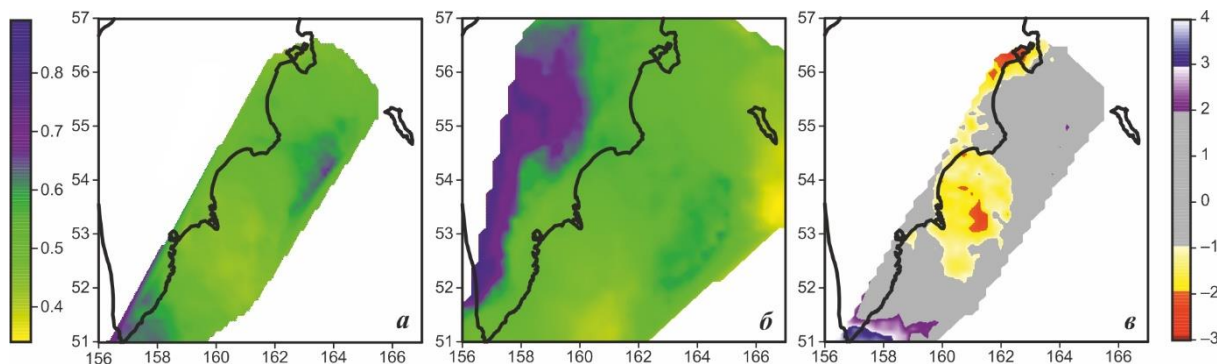
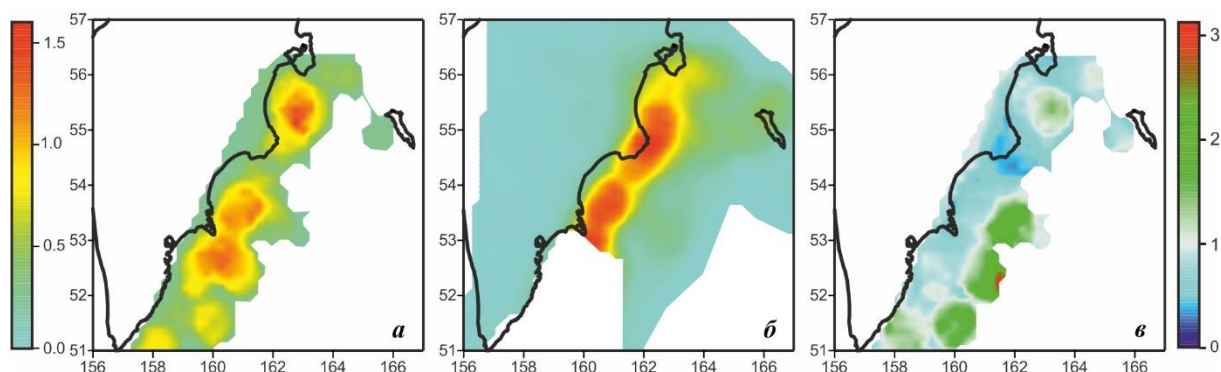


Рис. П.15. Карты наклона графика повторяемости  $\gamma$ , рассчитанные для 2017–2019 гг. (а), и для сравнения – для 1962–2019 гг. (б). Изменение  $\gamma$  в 2017–2019 гг. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение (в)

#### Сейсмическая активность $A_{10}$

Средняя по указанному району активность  $A_{10}$  в 2019 г. составила  $0.237 \pm 0.007$  при среднемноголетнем значении  $0.273 \pm 0.001$ . В целом активность региона была ниже среднего на  $\approx 13\%$ . 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 2019 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности

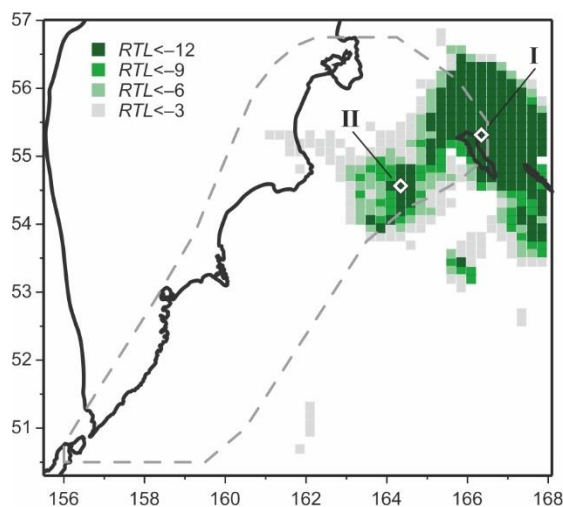
ниже среднего значения в районе Кроноцкого, Шипунского, Камчатского полуостровов, Авачинского, Кроноцкого и южной части Камчатского заливов. Активность превысила средние значения на юге Камчатки, восточнее Авачинского и Кроноцкого заливов и в центральной части Камчатского залива.



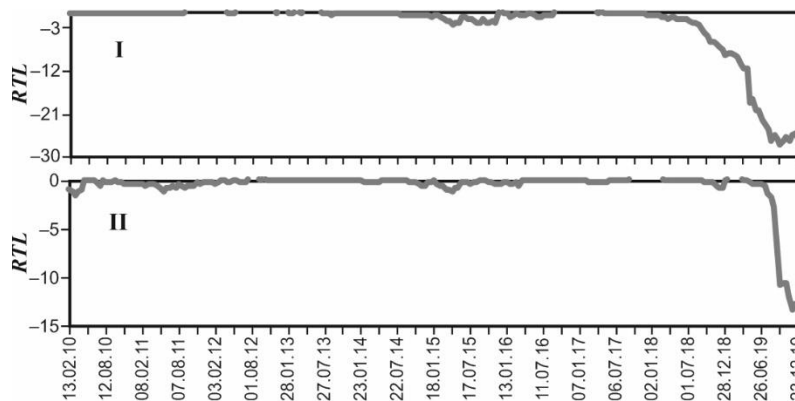
**Рис. II.16. Карты сейсмической активности  $A_{10}$  в 2019 г. (а) и 1962–2019 гг. (б). Активность  $A_{10}$  в 2019 г., нормированная на многолетнюю активность (в)**

### Мониторинг параметра $RTL$

На рис. II.17 показана карта минимальных значений параметра  $RTL$ , наблюдавшихся в течение 2019 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.18). Характерная точка определяется по минимальному значению  $RTL$  за время существования аномалии.



**Рис. II.17. Минимальные значения  $RTL$ -параметра в 2019 г. Ромбами обозначены характерные точки аномалий, пунктиром – область надежно-го определения параметра  $RTL$**

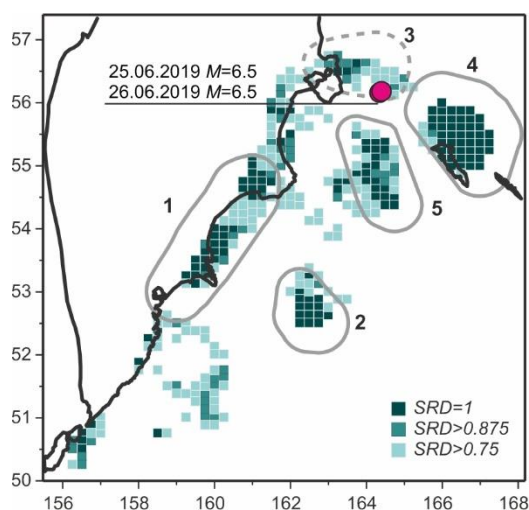


**Рис. II.18. Временной ход  $RTL$ -параметра в характерных точках аномалий (рис. II.17)**

Аномалии, вероятно, являются артефактом и обусловлены удалением из каталога афтершоков Ближне-Алеутского землетрясения ( $ML=7.8$ ,  $54.35^\circ N$ ,  $168.9^\circ E$ ), произошедшего 17.07.2017 г., и землетрясения Углового поднятия ( $ML=7.3$ ,  $54.9^\circ N$ ,  $164.7^\circ E$ ), произошедшего 20.12.2018 года.

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

На рис. II.19 показана карта максимальных значений статистически значимого ( $Z>3$ ) уменьшения скорости сейсмического потока  $SRD$ , наблюдавшихся в течение 2019 года. Пространственные области абсолютного сейсмического затишья (на глубинах до 70 км не было зафиксировано ни одного землетрясения с энергетическим классом  $K_s \geq 8.5$ ) в течение не менее года оконтурены. На картах также отмечены эпицентры землетрясений, сопоставленных с предваряющими их аномалиями. 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.20). Стрелками отмечены моменты соответствующих землетрясений.



**Рис. II.19. Карты максимальных значений  $SRD$  в течение 2019 г.**

Области сейсмического затишья оконтурены. Отмечены эпицентры землетрясений 25 и 26 июня 2019 г.

Сейсмическое затишье в зоне 1 отмечено с января 2016 г. по январь 2017 года.

В зоне 2 низкая сейсмичность проявлялась с марта 2018 г. по март 2019 года.

Уменьшение скорости сейсмического потока в 9 раз ( $SRD=0.93$ ) наблюдалось в зоне 3 с мая 2018 г. по апрель 2019 года. 25 и 26 июня на краю аномалии произошли два землетрясения с магнитудами  $M=6.5$ . Положение землетрясений и время между окончанием затишья и землетрясением (два месяца) позволяют рассматривать это затишье как предвестниковое.

Аномалия в зонах 4 и 5, так же, как и аномалии  $RTL$  в этом районе, возможно, обусловлена удалением афтершоков сильных землетрясений 17.07.2017 г. с  $ML=7.8$  и 20.12.2018 г. с  $ML=7.3$ .

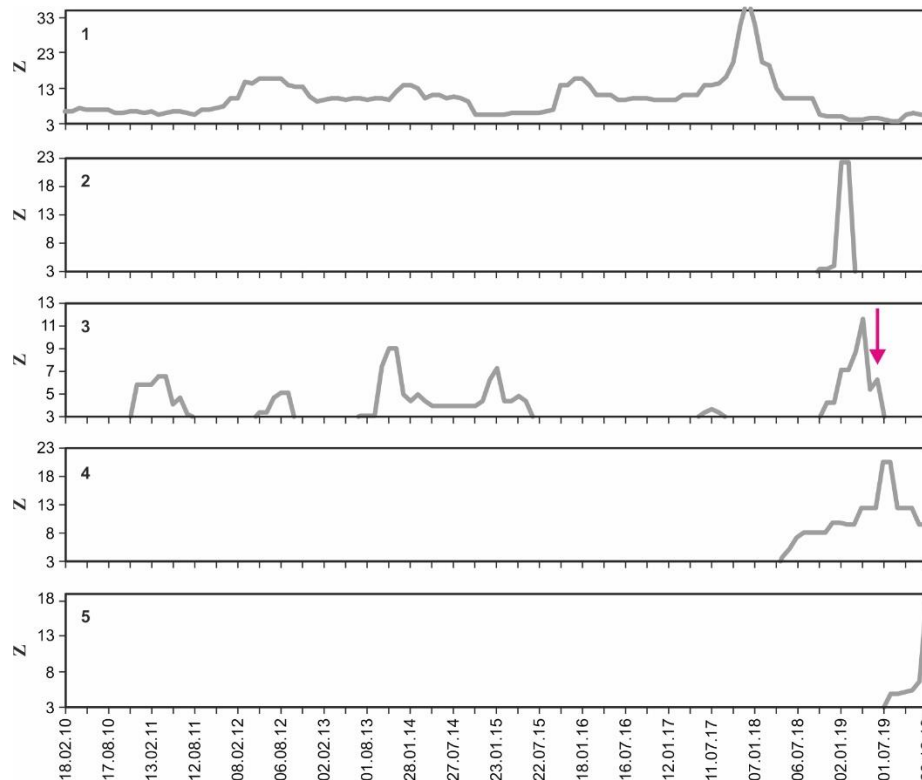
#### **Заключение**

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2019 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность  $A_{10}$ , наклон графика повторяемости  $\gamma$ , параметры методик  $RTL$  и «Z-функция». Проведено сравнение значений параметров  $A_{10}$  и  $\gamma$ , полученных для 2019 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2019 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2019 г.:

– уровень сейсмичности Камчатского региона в 2019 г. по шкале «СОУС'09» – фоновый средний;





**Рис. 11.20. Зависимости  $Z(t)$ , рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. 11.19). Стрелкой отмечены моменты землетрясений 25 и 26 июня 2019 г.**

– на севере сейсмоактивной зоны в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова наблюдается снижение активности  $A_{10}$ , в районе острова Беринга развиваются  $Z$ - и  $RTL$ -аномалии;

– в районе Кроноцкого залива и мыса Шипунского завершилась многолетняя  $Z$ -аномалия, отмечаются пониженные значения активности  $A_{10}$  и наклона графика повторяемости  $\gamma$ ;

– на юге Камчатки наблюдались повышенные значения  $A_{10}$  и  $\gamma$ .

## 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. Part\_IV-2019. 11\_Kamchatka-and-Komandor-Islands\_2019.xls // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – Приложение на CD-ROM.
3. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.) // Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (дата обращения 01.11.2020).
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.