

## СТАДИЙНОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ КАМЧАТКИ, ЯПОНИИ И ИСЛАНДИИ

© 2023 г. В. Б. Смирнов<sup>1, 2, \*</sup>, А. А. Петрушов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: vs60@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04.2023 г.

После доработки 16.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Представлены результаты выявления стадийности проявления аномалий параметров сейсмического режима перед землетрясениями различных магнитуд. Под стадийностью понимается соотношение времен формирования и развития аномалий различных параметров сейсмического режима. Для анализа отобраны землетрясения в областях с двумя генеральными тектоническими типами: в зоне субдукции (Камчатка и Япония) и в рифтовой зоне (Исландия). Выбор регионов определялся, в первую очередь, доступностью и качеством региональных сейсмических каталогов. В качестве параметров сейсмического режима рассматривались наклон графика повторяемости и комплексный параметр, известный как *RTL*. Пространственно-временные аномалии выявлялись перед отобранными землетрясениями на основе известных “образов предвестников” параметров сейсмического режима. Сопоставление длительностей выявленных аномалий показало, что аномалии наклона графика повторяемости возникают, в целом, раньше, чем аномалии *RTL*. Высказаны предположения о возможной причине такой стадийности проявления аномалий. В окрестностях изученных землетрясений оценивалось также изменение параметра концентрации сейсмогенных разрывов в пределах соответствующих сейсмических циклов. Сопоставление времен возникновения выявленных аномалий сейсмического режима с соответствующими этим временам значениями параметра концентрации сейсмогенных разрывов показало, что формирование аномалий сейсмического режима происходит на стадии, когда состояние системы накопившихся за время сейсмического цикла сейсмогенных разрывов практически достигло критического значения.

**Ключевые слова:** сейсмический режим, сейсмические аномалии, стадийность.

**DOI:** 10.31857/S0002333723050125, **EDN:** WAGJPE

### ВВЕДЕНИЕ

Аномалии сейсмического режима — это наиболее уверенно обнаруживаемые геофизические эффекты, связанные с процессами подготовки землетрясений. Подавляющее большинство известных в настоящее время прогностических алгоритмов подвергают анализу именно данные каталогов землетрясений. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что процессы подготовки очагов сильных землетрясений связаны с постепенным развитием разрушения на меньших масштабных уровнях. С другой стороны, сейсмические каталоги обеспечивают повсеместно в областях сейсмогенерации необходимую пространственную детальность информации. Для обнаружения пространственно-временной структуры прогностической аномалии в очаговой области сильнейших землетрясений с характерным размером очага в

100 км (землетрясения магнитуды 8) необходимо иметь детальность исходных геофизических данных наблюдений 10–20 км. А для более слабых, но опасных в практическом отношении землетрясений с размером очага в 30 км (магнитуда 6.5), нужна детальность наблюдений в 3–5 км. Такое пространственное разрешение обеспечивают современные сейсмические каталоги, формируемые по данным мировых или региональных сейсмических сетей, которые повсеместно имеют точность локализации эпицентров событий не хуже 5 км, а глубин — как правило, не хуже 10 км. Пространственная детальность наземных наблюдений других геофизических полей (деформационного, магнитного, гравитационного и пр.) определяется средним расстоянием между соответствующими геофизическими обсерваториями, которые составляют обычно сотни километров. Это на порядок—полтора хуже, чем разрешения сейсмиче-

ских каталогов. Ряд дистанционных спутниковых методов измерения геофизических полей обеспечивает необходимое пространственное разрешение в единицы—первые десятки километров, но эффективная чувствительность почти всех этих методов пока недостаточна для обнаружения аномалий, обусловленных процессами подготовки даже наиболее сильных землетрясений.

Мировая практика прогностических исследований выявила ряд статистических параметров сейсмического режима, аномальные изменения которых рассматриваются как индикаторы процессов подготовки землетрясений. К ним, в первую очередь, относятся характеристики энергетического “спектра” сейсмичности: наклон графика повторяемости, различные характеристики сейсмической активности; характеристики пространственной, временной или пространственно-временной плотности высвобождающейся сейсмической энергии; параметры кластеризации и взаимодействия землетрясений [Соболев, 1993; Завьялов, 2006; Соболев, Пономарев, 2003; Panza et al., 2022]. Для некоторых из этих параметров известны “образы предвестников” — характерные временные формы аномалий и их распределения в пространстве в области подготовки землетрясения.

В настоящей работе представлены результаты выявления стadiйности проявления аномалий параметров сейсмического режима перед относительно сильными землетрясениями. Под стadiйностью понимается соотношение времен формирования и развития аномалий различных параметров сейсмического режима. Отобраны землетрясения в областях с двумя генеральными тектоническими типами: в зоне субдукции (каталоги Камчатки и Японии) и в рифтовой зоне (каталог Исландии). Выбор именно этих регионов определялся, в первую очередь, доступностью и качеством сейсмических каталогов.

Отметим, что мы не ставим перед собой задачу разработки или модификации прогностических алгоритмов и их практического применения. На настоящем этапе исследование направлено на сопоставление пространственно-временных областей проявления сейсмических аномалий и выяснение закономерностей следования аномалий во времени. Мы отбирали только те землетрясения, перед которыми выявляются надежные аномалии сейсмического режима и не рассматривали вопрос, когда и почему аномалии наблюдаются, а когда нет. В дальнейшем, по мере накопления информации мы планируем классифицировать ее с целью выяснения наличия или отсутствия особенностей стadiйности проявления аномалий. При выборе землетрясений исследуемых регионов мы вместе с собственными исследованиями учитывали литературные данные о наличии перед

рассматриваемыми землетрясениями прогностических аномалий сейсмического режима.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями, являющиеся предметом настоящей работы, относятся к так называемым физическим предвестникам землетрясений [Сидорин, 1992; Соболев, 1993]. Их происхождение связывают с развитием разрушения в локальной области литосферы, которое в конечном счете приводит к разрушению этой области очагом землетрясения. Известны несколько сценариев развития такого разрушения, приводящего к сильному землетрясению — качественных моделей подготовки землетрясений. Две основные модели были предложены в начале 70-х годов прошлого века почти одновременно в США — дилатантно-диффузная модель, и в СССР — модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (модель ЛНТ) [Miachkin et al., 1972; Schotz et al., 1973; Mjachkin et al., 1975]. Обе модели объясняли известные тогда свойства аномалий геофизических полей перед землетрясениями. В дальнейшем эти модели были модифицированы и развиты как в теоретическом, так и в статистическом отношении. Обе модели имеют свои сильные и слабые стороны и до сих пор конкурируют в объяснении эффектов, обнаруживаемых в динамике сейсмичности.

Исходя из моделей подготовки землетрясений, сформировался набор параметров сейсмичности, которые могут быть оценены статистически по данным каталогов землетрясений. Модель ЛНТ и сходные с ней модели подразумевают постепенное увеличение размеров сейсмогенных разрывов вследствие накопления и слияния меньших разрывов при достижении ими критической концентрации, обеспечивающей перекрытие аномальных полей напряжений, вызванных образованием разрыва. Соответственно, в качестве параметров, отражающих развитие процесса подготовки землетрясения, рассматриваются характеристики концентрации очагов землетрясений, соотношения частот землетрясений различных энергий (магнитуд), характеристики влияния произошедших землетрясений на последующие, характеристики пространственно-временной связности цепочек землетрясений и др. Ниже приведена краткая характеристика трех параметров, выбранных в настоящей работе.

### **Наклон графика повторяемости (параметр Гутенберга—Рихтера $b$ )**

Классический параметр сейсмического режима, показатель степени энергетического “спек-

тра” сейсмичности. Характеризует соотношение вероятностей возникновения землетрясений различных энергий (магнитуд). Аномалии параметра  $b$ , наблюдаемые перед сильными землетрясениями, являются одним из наиболее надежных признаков формирования неустойчивости в области подготовки сильного землетрясения и наиболее часто используются в прогностических алгоритмах. “Образ предвестника” – уменьшение величины  $b$  (которому иногда предшествует небольшое его увеличение) перед сильным землетрясением обоснован сценарием накопления и слияния сейсмогенных разрывов, приводящим к образованию более крупных сейсмических событий. В сейсмической статистике проявляется увеличением относительной доли более сильных землетрясений, что отражается в уменьшении величины  $b$ . Для оценки параметра  $b$  мы применяем методику на основе оценки максимального правдоподобия, модифицированную на случай усеченных распределений землетрясений по магнитудам [Смирнов, Пономарев, 2020<sup>1</sup>].

### Параметр $RTL$

Комплексный параметр  $RTL$ , предложенный Г.А. Соболевым [Соболев и др., 1996] по своей сути представляет собой суммарное “сейсмовыделение”, рассчитываемое для каждой выбранной точки пространства и каждого выбранного момента времени, статистически взвешенное с учетом расстояния и времени от произошедшего землетрясения до выбранной точки и выбранного момента времени. Вклад величины произошедшего землетрясения учитывается показателем степени, в которую при суммировании возводится размер его очага. Разные значения показателей можно соотнести с суммированием различных характеристик “сейсмывыделения”: значение показателя 1 – суммирование (накопление) подвижек в очагах землетрясений, 2 – суммирование (накопление) площадей разрывов, 3 – суммирование энергий (энерговыведение). Учет удаления точки пространства и момента времени, для которых производится расчет, от точки и времени очага произошедшего землетрясения производится с помощью экспоненциальных множителей. “Образ” предвестниковой аномалии: уменьшение  $RTL$  (сейсмическое затишье), сменяющееся его увеличением (форшоковая активизация) [Соболев, Пономарев, 2003]. Оба эффекта – затишье и активизация – имеют физическое объяснение в рамках концепции ЛНТ процесса подготовки очага сильного землетрясения [Соболев, 2019]. Алгоритм  $RTL$  имеет достаточное широкое применение как в России, так и за рубежом [Nagao et al., 2011; Proskura et al., 2019; Zhang,

Huang, 2022]. Параметр  $RTL$  можно также рассматривать как характеристику (функцию) влияния землетрясений [Смирнов, Пономарев, 2020].

Для оценки параметра  $RTL$  применяется авторское программное обеспечение, первая версия которого была использована в указанной выше пионерской работе [Соболев и др., 1996]. Последняя, наиболее продвинутая версия, написана в 2022 г. [Петрушов, Смирнов, 2022] и поддерживается на текущий момент<sup>2</sup>.

### Параметр концентрации сейсмогенных разрывов

Параметр концентрации сейсмогенных разрывов введен в лабораторных исследованиях С.Н. Журковым и В.С. Куксенко [Журков и др., 1977] и перенесен на масштаб сейсмичности Г.А. Соболевым и А.Д. Завьяловым [Соболев, Завьялов, 1980]. Используется в прогностических исследованиях в комплексе с другими характеристиками для построения прогностических карт областей повышенной вероятности ожидаемых землетрясений [Завьялов, 2006]. По сути, представляет собой отношение среднего расстояния между очагами землетрясений к размеру очагов. Характеризует степень близости режима разрушения к условиям лавинообразного нарастания. Когда расстояние между образовавшимися к данному времени разрывами много больше их размера, разрывы не “взаимодействуют” – искаженные разрывами поля напряжений не перекрываются. Когда, вследствие накопления разрывов и увеличения их концентрации, расстояние между разрывами становится сравнимым с их размерами, возмущения локальных полей напряжений в окрестности вершин должны образовать ориентированных разрывов начинают перекрываться, что увеличивает вероятность разрушения перемычки между разрывами и образования менее устойчивого разрыва большего размера. Согласно концепции ЛНТ это состояние характеризует переход процесса разрушения к лавинообразной стадии. Оценка параметра концентрации сейсмогенных разрывов производилась по стандартной методике [Завьялов, 2006].

### ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Параметры рассчитываются в пространственно-временных окнах, результаты представляются в виде карт распределения значений параметров на каждый выбранный момент времени. Для выбранных локальных пространственных областей приводятся изменения параметров во времени.

<sup>1</sup> <https://cloud.mail.ru/public/rfq3/CNDPQRZ7r>

<sup>2</sup> <https://gitlab.com/Mr.Brain/PyRTL>

Согласно работам [Соболев и др., 1996; Соболев, Пономарев, 2003] параметр  $RTL$  рассчитывается как произведение трех функций:

$$RTL = RTL, \quad (1)$$

$$R(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) - R_s, \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{t_i}{t_0}\right) - T_s, \quad (3)$$

$$L(x, y, z, t) = \sum_i \left(\frac{l_i}{l_0}\right)^p - L_s. \quad (4)$$

$RTL$  рассчитывается в определенной пространственной точке с координатами  $(x, y, z)$  и на определенный момент времени  $t$ . Здесь:  $r_i$  – расстояние от  $i$ -го землетрясения до точки  $(x, y, z)$ ;  $t_i$  – интервал времени с момента  $i$ -го землетрясения до заданного времени  $t$ ;  $l_i$  – размер очага  $i$ -го землетрясения. Коэффициенты  $r_0$ ,  $t_0$  и  $l_0$  являются параметрами алгоритма, они подбираются эмпирически при настройке алгоритма на региональные особенности сейсмичности и магнитудный диапазон исследуемых землетрясений по максимуму выявляемой аномалии. Поправки  $R_s$ ,  $T_s$  и  $L_s$  введены для удаления линейных трендов во времени каждой из трех функций.

Алгоритм  $RTL$  реализован в виде программного пакета PyRTL на языке Python 3 с использованием современных библиотек обработки и визуализации данных (в том числе numpy, scipy, matplotlib). Методология обработки временных зависимостей параметра  $RTL$  сильно влияет на стабильность работы алгоритма, и на выбор способа обработки данных было обращено особое внимание. Процедура расчета параметра  $RTL$  на заданный момент времени  $t$  проводится в несколько этапов.

а). Расчет исходных значений функций  $R$ ,  $T$ ,  $L$ . На этом этапе производится расчет трех функций по отдельности согласно формулам (2), (3), (4). Значения  $R$  и  $L$  рассчитываются по данным всех землетрясений, произошедших к моменту времени  $t$ . Эти функции монотонно не убывают со временем, так как к ним добавляются все новые и новые положительные члены. Функция  $T$  ведет себя немонотонно, так как влияние уже произошедших землетрясений со временем экспоненциально убывает. Все три функции рассчитываются в заданной точке пространства, и учитывают события, эпицентры которых находятся в некоторой окрестности заданной точки. Для ускорения работы алгоритма было введено ограничение области расчета радиусом, в несколько раз превосходящим значение  $r_0$ . Для функции  $T$  применялось аналогичное ограничение интервала времени (в несколько раз превышающего значение

$t_0$ ). Эти допущения оправданы экспоненциальными весовыми множителями в выражениях (2) и (3).

б). Удаление линейного тренда. После расчета функций  $R$ ,  $T$  и  $L$  в каждой точке пространства производится удаление их линейного тренда во времени. В результате получаются временные ряды с нулевым средним значением.

в). Расчет  $RTL$  и нормировка. Полученные на предыдущем этапе значения функций  $R$ ,  $T$  и  $L$  без линейного тренда перемножаются и формируют параметр  $RTL$ . Затем производится нормировка  $RTL$  на его стандартное отклонение, рассчитанное по всему временному ряду с момента начала построения. Итоговые значения представляют собой временной ряд  $RTL$  в единицах своего стандартного отклонения.

Выше отмечалось, что понижение значений параметра  $RTL$  относительно долговременного фонового уровня в некоторой пространственно-временной области характерно для стадии сейсмического затишья, а последующее восстановление до фонового уровня или превышения его происходит на стадии форшоковой активизации. Такое поведение параметра принято считать аномалией (в некоторых случаях за аномалию принимается лишь падение значений ниже фонового уровня). Отметим, что в последние годы возрос интерес к анализу алгоритма и его параметров с помощью технологий машинного обучения [Proskura et al., 2019; Kali et al., 2021]. Авторы последней работы рассмотрели возможность применения моделей нейронных сетей-классификаторов, на вход которых подаются значения функции  $RTL$ . Эффективность обученной таким образом модели сопоставима с наилучшей эффективностью среди 7 моделей, рассматриваемых в работе [Kali et al., 2021].

Особенности построения оценок наклона графика повторяемости подробно изложены в работе [Смирнов, Пономарев, 2020]. Для определения величины наклона графика повторяемости  $b$  и его погрешности  $\sigma_b$  зачастую используется оценка максимального правдоподобия для негруппированной выборки [Aki, 1965; Кендалл, Стьюарт, 1973]:

$$b = \frac{1}{\bar{M} - M_1} \frac{1}{\ln 10}, \quad (5)$$

$$\sigma_b = b/\sqrt{N}, \quad (5')$$

где:  $\bar{M}$  – среднее значение магнитуды;  $M_1$  – минимальная магнитуда в выборке;  $N$  – количество сейсмических событий, использованных для оценивания  $b$ .

Оценка (5) соответствует истинному значению  $b$  в предположении, что значения магнитуд не ограничены сверху. Оценка  $\bar{M}$  как среднего зна-

чения по конечной выборке оказывается смещенной, поскольку выборка оказывается фактически цензурированной сверху некоторой магнитудой. В таком случае среднее значение  $\bar{M}$  по этой выборке будет меньше истинного матожидания, а, значит, оценка (5) даст завышенное значение  $b$ . В связи с этим при расчете наклона графика повторяемости применяется оценка максимального правдоподобия для цензурированной выборки:

$$\frac{1}{b_{\min}} = \frac{1}{b_{\max}} + \frac{\Delta M \ln 10}{10^{b_{\min} \Delta M} - 1}, \quad \Delta M = M_2 - M_1, \quad (6)$$

где  $M_2$  — верхний порог магнитуды в выборке, значение  $b_{\max}$  рассчитывается по формуле (5), значение  $b_{\min}$  дается решением алгебраического уравнения (6). Вывод уравнения (6), историю вопроса и описание практики применения можно найти в работе [Смирнов, Пономарев, 2020].

Рассматривая (5) и (6) как оценки наклона графика повторяемости сверху и снизу, соответственно, рассчитываем итоговое значение  $b$  как их полусумму:

$$b = \frac{b_{\max} + b_{\min}}{2}. \quad (7)$$

Для выявления аномалий наклона графика повторяемости часто используется параметр  $Z$  ( $Z$ -критерий) [Салтыков, Коновалова, 2010; Салтыков и др., 2013]. Величина  $Z$  является мерой статистической значимости отклонений параметра  $b$  от его долговременных значений. Наклон графика повторяемости рассчитывается в большом окне (отражающем его фоновые значения) и в рабочем окне, отражающем текущее значение, и, затем, вычисляется величина  $Z$ :

$$Z = \frac{b_2 - b_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}, \quad (8)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  — значения наклонов графика повторяемости в фоновом и рабочем окнах, соответственно;  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  — дисперсии (квадраты погрешностей) оценок  $b_1$  и  $b_2$ .

Расчет значений параметра концентрации сейсмогенных разрывов производился согласно выражению:

$$K_{\text{cp}} = \frac{\mu}{l_{\text{av}}^3}, \quad (9)$$

где:  $\mu$  — объемная плотность (концентрация) разрывов;  $l_{\text{av}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$  — средний по заданной области размер разрыва;  $n$  — число событий в заданной области [Завьялов, 2006]. Изначально задавался порог магнитуды событий, подлежащих

анализу. Расчет сбрасывался каждый раз, когда происходило событие выше заданного энергетического порога. Такой метод расчета  $K_{\text{cp}}$  обусловлен представлениями о сейсмическом цикле и описан в работе [Завьялов, 2006]. Рассматриваемые сейсмоактивные регионы разбивались на элементарные сейсмоактивные ячейки размерами  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  по площади, и  $\Delta H$  в глубину. Для каждого элементарного объема рассчитывались значения величины параметра  $K_{\text{cp}}$  как функция времени. Для сглаживания возможных ошибок в определении гипоцентров ячейки перекрывались наполовину [Завьялов, 2006].

С физической точки зрения концентрационный критерий разрушения отражает потерю устойчивости системы трещин в поле напряжений [Завьялов, 2006; Смирнов, Пономарев, 2020]. Трещины теряют устойчивость, динамически растут и сливаются в более крупные трещины, когда они расположены достаточно близко друг к другу, т. е. когда в некоторой области пространства имеется достаточно высокая концентрация трещин. Процесс сопровождается уменьшением значения параметра  $K_{\text{cp}}$  во времени.

Критическое значение  $K_{\text{cp}}^*$ , при котором происходит основное землетрясение, варьируется для разных сейсмоактивных регионов. В случае неравномерного и фрактального распределения землетрясений в пространстве величина  $K_{\text{cp}}^*$  зависит также от размера ячейки, по которой производится оценка согласно формуле (9) [Смирнов, Завьялов, 1996].

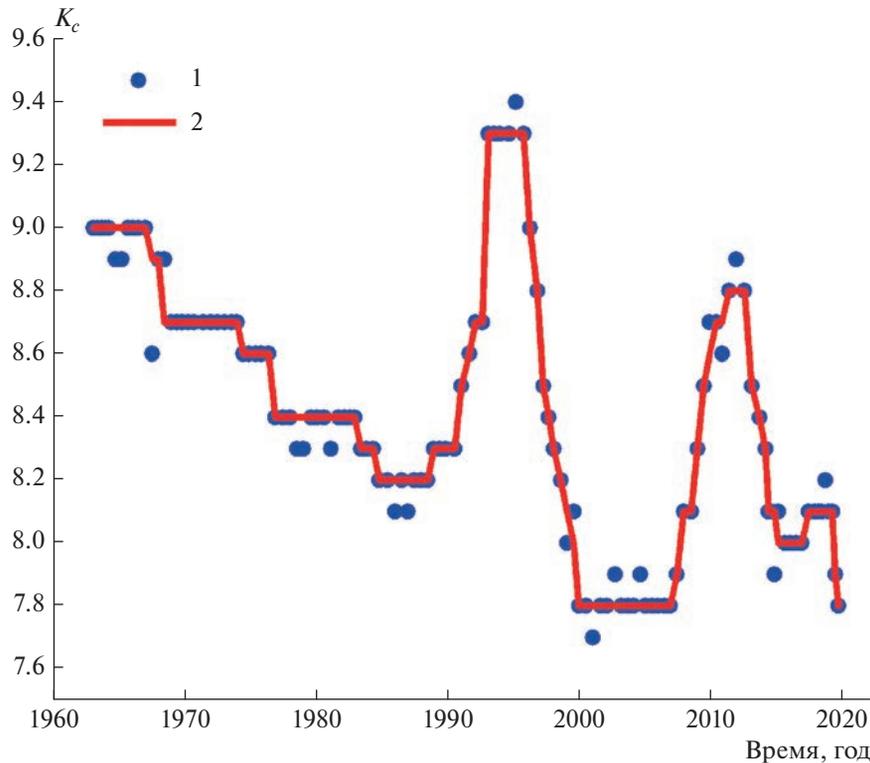
Расчет длины сейсмогенного разрыва, входящей в (9), основывается на корреляционной связи размера очага с магнитудой (или энергетическим классом) землетрясения:

$$\lg l_i = \alpha M_i + c, \quad (10)$$

где  $M_i$  — энергетическая характеристика землетрясения (магнитуда или энергетический класс). Выбор коэффициентов  $\alpha$  и  $c$  в соотношении (10) осуществлялся согласно рекомендациям, изложенным в работе [Смирнов, Пономарев, 2020], на основе формулы Садовского [Садовский и др., 1983] и общепринятых соотношений между магнитудами с энергией землетрясения.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Все каталоги землетрясений, используемые в этой работе, получены из открытых источников. На стадии подготовки каталоги помещались в специализированные базы данных и подвергались стандартной процедуре первичного анализа, включавшей контроль формата входных данных, контроль наличия дублей, идентификации и ис-



**Рис. 1.** Изменение представительного класса во времени для каталога Камчатки: 1 — исходные оценки, 2 — сглаженная кривая.

ключения афтершоков, оценки представительной магнитуды и анализа ее изменений [Смирнов, Пономарев, 2020].

### Каталог Камчатки

Региональный каталог землетрясений Камчатки получен на сайте “Единой информационной системы сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН”<sup>3</sup>. Описание системы сейсмологических наблюдений на Камчатке и указанной информационной системы представлено в работах [Чебров и др., 2013; Чеброва и др., 2020]. Описание информации, содержащейся в каталоге, доступно на сайте ЕССД КФ ФИЦ ЕГС РАН<sup>4</sup>. Нами был загружен каталог невулканических землетрясений (по классификации ЕССД КФ ФИЦ ЕГС РАН) за весь период наблюдений.

Энергетические характеристики в каталоге Камчатки приведены в энергетических классах, соответствующие значения магнитуд пересчитаны по корреляционной зависимости. Мы использовали исходные значения энергетических классов.

Пространственно-временные изменения представительного класса регионального каталога

землетрясений Камчатки были подробно исследованы нами в работе [Смирнов и др., 2019]. В качестве общей характеристики на рис. 1 представлено изменение представительного класса во времени из работы [Смирнов и др., 2019], дополненное данными за 2019–2023 годы. В работе [Смирнов и др., 2019] отмечалось, что представительный класс колеблется от 6.5 до 9.5 в зависимости от времени и места и превышает уровень  $K_c = 9.5$  только в отдельные моменты времени в самой южной части региона.

### Каталог Японии

Региональный каталог Японии, так же как и каталог Камчатки, был подробно исследован на предмет оценки представительной магнитуды в работе [Смирнов и др., 2019]. Там отмечалось следующее: “В качестве исходных данных использовались записи из каталога Международного сейсмологического центра, ISC<sup>5</sup>, представленные в нем Японским метеорологическим агентством (Japan Meteorological Agency, JMA). В каталоге приведены локальные магнитуды. Ортогональная регрессия значений  $M_W$  из Гарвардского каталога центроид-моментов и магнитуды  $M$  из

<sup>3</sup> <https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>

<sup>4</sup> <https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php?out=info>

<sup>5</sup> <ftp://isc-mirror.iris.washington.edu/pub/>

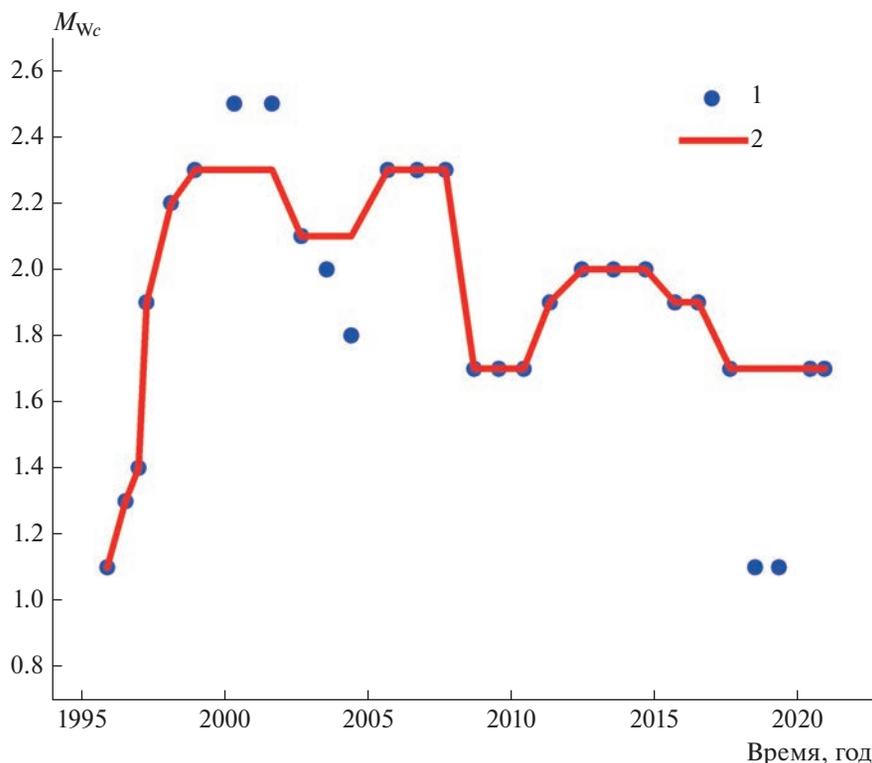


Рис. 2. Изменение представительной магнитуды во времени для каталога Исландии: 1 — исходные оценки, 2 — сглаженная кривая.

отобранного нами каталога JMA дает соотношение  $M_w = (0.98 \pm 0.02)M + (0.24 \pm 1)$ , которое близко к соотношению  $M = M_w$ . Анализ представительной магнитуды показал, что начиная с 1981 г. на всей территории представительны события с  $M \geq 3.3$ .<sup>6</sup>

### Каталог Исландии

Региональный каталог Исландии свободно доступен на сайте Исландского метеорологического агентства (Icelandic Meteorological Office)<sup>6</sup>. В каталоге представлены данные за период 1995–2023 гг. Общее количество записей — более 500 тыс. В каталоге приведены локальные и моментные магнитуды, мы использовали последние. Описание сейсмической сети и сейсмической службы Исландии можно найти в работе [Stefansson, 2011].

На рис. 2 представлено изменение представительной магнитуды каталога Исландии во времени. Видно, что на всем интервале наблюдений можно считать представительными события с  $M_w \geq 2.4$ . Анализ распределения представительной магнитуды в пространстве свидетельствует, что этот порог приемлем для всего каталога.

<sup>6</sup> <http://hraun.vedur.is/ja/viku/>

### РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены сведения об отобранных землетрясениях, их расположение на карте показано на рис. 3. Для обеспечения сопоставимости энергетический класс  $K$ , представленный в каталоге землетрясений Камчатки, пересчитан в моментную магнитуду  $M_w$  по формулам, используемым в “Единой информационной системе сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН”<sup>7</sup>:  $M_l = 0.5K - 0.75$  и  $M_w = M_l - 0.4$ .

Для каждого исследуемого землетрясения строились карты распределения параметров  $RTL$  и  $b$  в пространстве в последовательные моменты времени, предшествующие землетрясению, и визуально выявлялись их аномалии перед землетрясением. Затем, для центральной части аномалии строились кривые изменения параметров во времени. Эти кривые строились до момента времени за день до даты землетрясения.

Пороги селекции каталогов и расчетные окна для алгоритмов варьировались для разных землетрясений с целью получения наиболее выраженных и устойчивых аномалий (табл. 2 и табл. 3). При выборе порога селекции по магнитуде учиты-

<sup>7</sup> [https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php?out=info&informationShow=show#Mw=f\(Ml\)](https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php?out=info&informationShow=show#Mw=f(Ml))

Таблица 1. Характеристики землетрясений, отобранных для анализа

Камчатка	Дата	Долгота	Широта	Глубина	Энергетический класс (магнитуда $M_W$ )
1	02.03.1992	160.20	52.76	20	14.6 (6.2)
2	08.06.1993	157.80	51.20	40	15.0 (6.4)
3	12.11.1993	158.83	51.79	40	14.6 (6.2)
4	05.12.1997	162.55	54.64	10	15.5 (6.6)
5	20.02.2011	162.47	55.73	49	14.1 (5.9)
6	28.02.2013	157.77	50.67	61	15.2 (6.5)
Япония	Дата	Долгота	Широта	Глубина	Магнитуда $M_W$
7	04.10.1994	147.68	43.37	28	8.1
8	25.09.2003	144.10	41.78	45	8.0
9	11.03.2011	142.86	38.10	24	9.1
Исландия	Дата	Долгота	Широта	Глубина	Магнитуда $M_W$
10	17.06.2000	-20.37	63.975	6.35	5.5
11	29.05.2008	-21.068	63.973	5.14	5.3
12	20.06.2020	-18.551	66.254	10.01	5.6

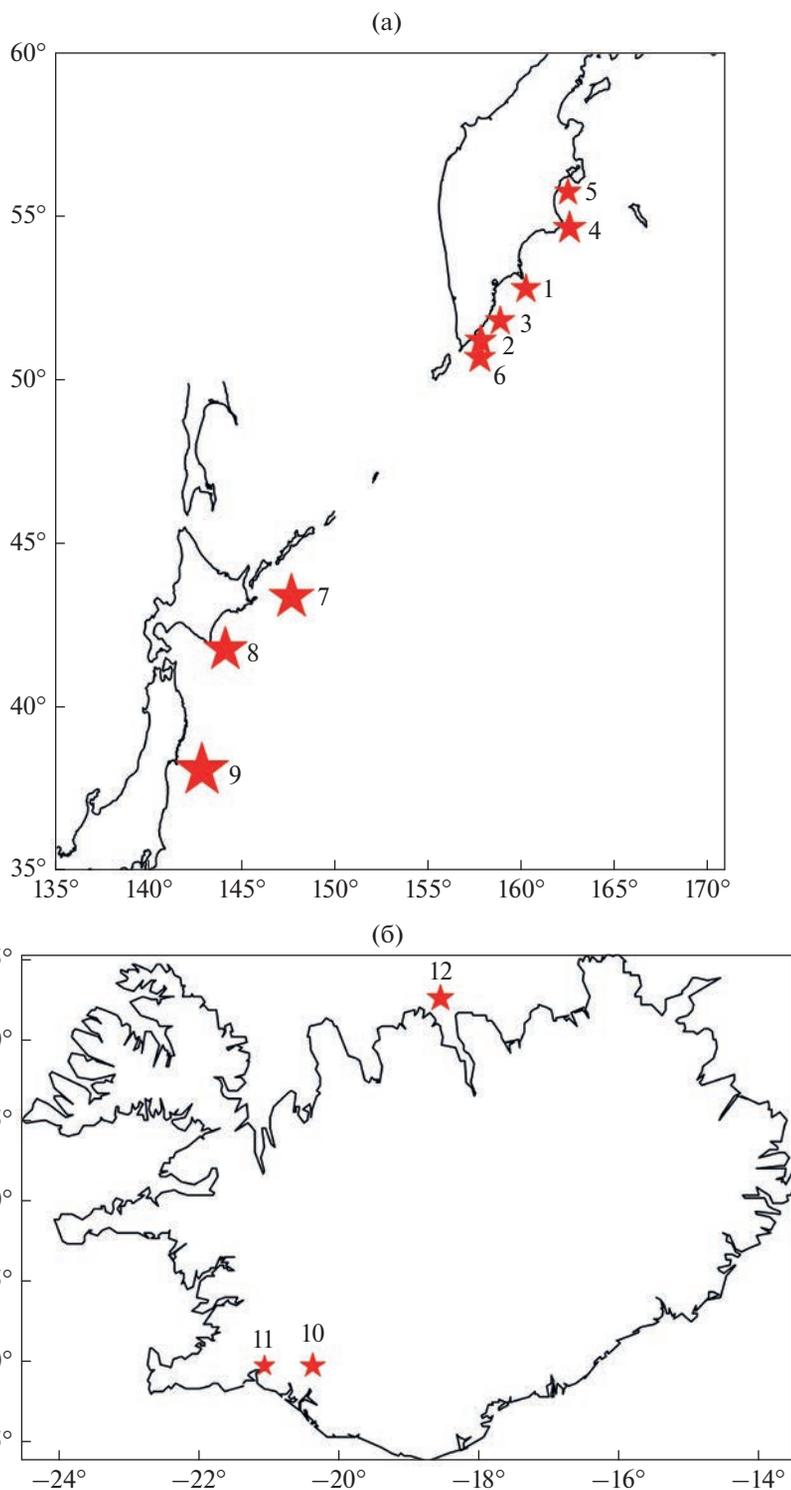
валась не только общая оценка представительности каталога, но и оценка представительной магнитуды в пространственно-временной окрестности соответствующего землетрясения. При расчете  $RTL$  в формуле (4) значение параметра  $p$  положено равным 1 в соответствии с общепринятой практикой [Соболев, Пономарев, 2003]. Отметим, что в статистическом смысле это значение обеспечивает устойчивость оценки среднего “энерговыведения” [Михайлов и др., 2010; Смирнов, Завьялов, 2012]. С физической точки зрения значение  $p = 1$  отражает суммирование подвижек в очагах землетрясений (принимаемых пропорциональными длинам разрывов) [Смирнов, Пономарев, 2020]. Значение коэффициента  $l_0$  при данной реализации алгоритма роли не играет, так как вносит в (4) линейный тренд, снимаемый далее перед расчетом параметра  $RTL$ .

На рис. 4 и рис. 5 представлены карты распределения исследуемых параметров сейсмического режима в момент наибольшей величины аномалии и графики изменения значений параметров во времени в областях наибольших аномалий соответствующего параметра. Отметим, что области наибольших значений  $b$  и  $RTL$  в пространстве не всегда совпадают. Шкала времени дана в годах до момента соответствующего землетрясения. Параметр  $RTL$  нормирован на величину своего долговременного стандартного отклонения (см. выше описание процедуры оценки  $RTL$ ). Для наклона графика повторяемости вместо карт  $b$  на рис. 4,

рис. 5 представлены карты параметра  $Z$  (формула (8)). Этот параметр учитывает как сами значения параметра  $b$ , так и их статистические погрешности в сравнении с их долговременными значениями. В этом смысле параметр  $Z$  сопоставим с  $RTL$  (который также нормирован на свое долговременное стандартное отклонение), а его карты более контрастны, чем карты значений  $b$ .

На рис. 4 и рис. 5 приведены также кривые изменения во времени параметра концентрации сейсмогенных разрывов  $K_{cp}$ . Этот параметр оценивался в выбранных пространственных окнах на интервале времени вплоть до изучаемого землетрясения. Согласно рекомендациям [Завьялов, 2006] расчет  $K_{cp}$  начинался от предшествующего сильного землетрясения в исследуемой области пространства.

Красным цветом на временных графиках на рис. 4, рис. 5 показаны аномалии  $RTL$  и параметра  $b$ , выявленные в соответствии с их “образами предвестника”. Значение  $K_{cp}$ , в отличие от  $RTL$  и  $b$ , не имеет “образа предвестника”. Это — накопительный, кумулятивный параметр, для которого в прогностических исследованиях эмпирически определяется критическое значение, которое затем используется для прогноза. Критическое значение определяется на стадии обучения алгоритма и задается величиной  $K_{cp}$  в момент землетрясения, перед которым он рассчитывается. Исходя из этого критического значения выбирается уро-



**Рис. 3.** Карты эпицентров отобранных землетрясений: (а) – Камчатка и Япония; (б) – Исландия. Размеры значков пропорциональны магнитуде, номера соответствуют табл. 1.

вень  $K_{ср}$ , при котором объявляется тревога [Завьялов, 2006]. Мы не использовали в настоящей работе идеологию прогностического исследования.

Параметр  $K_{ср}$  важен нам как индикатор степени близости режима разрушения к условиям лавинообразного нарастания. Мы оценивали величины

**Таблица 2.** Параметры селекции каталогов и расчетные окна алгоритмов для анализа землетрясений Японии и Исландии

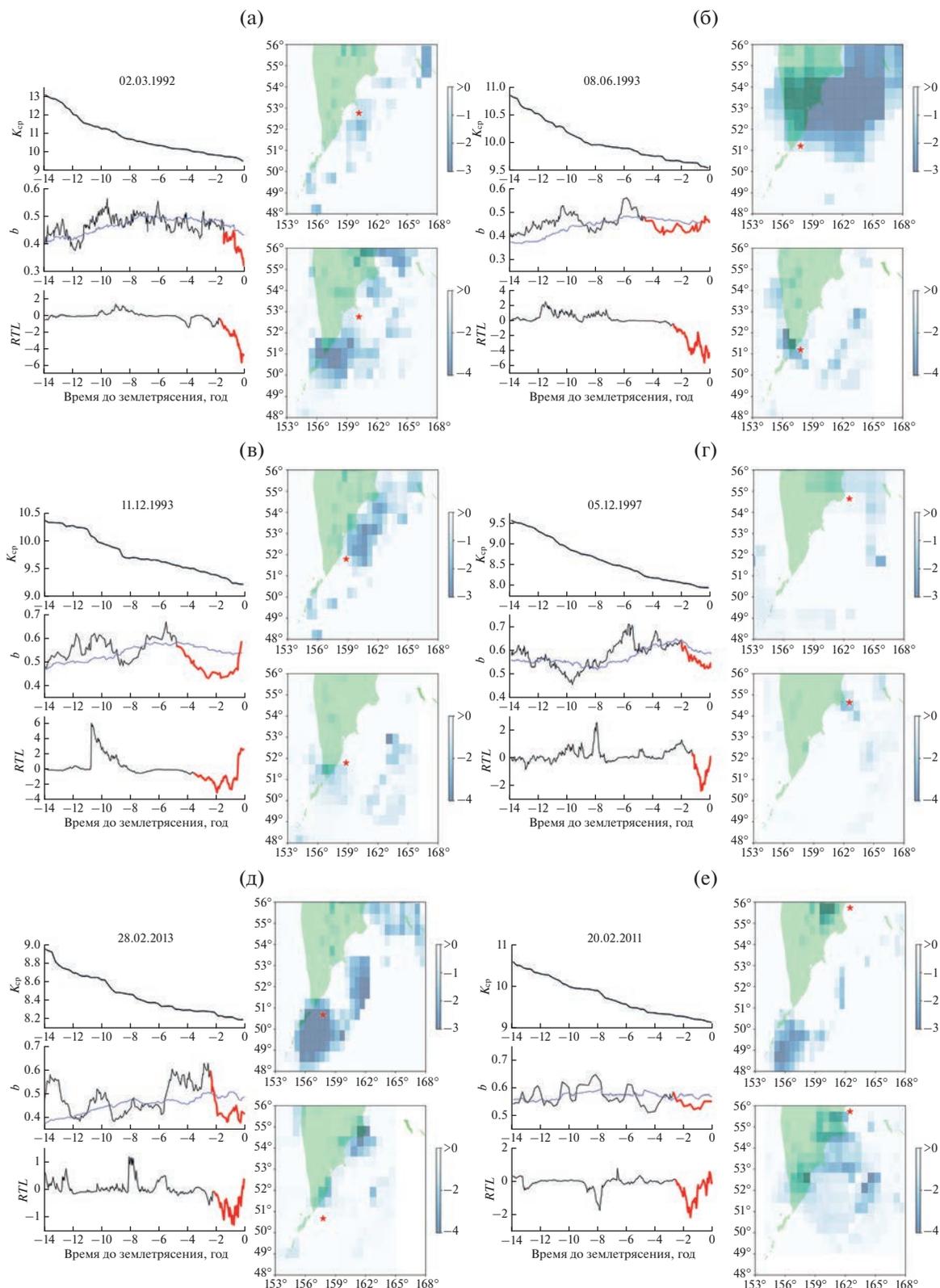
Землетрясение (дата)	17.06.2000	29.05.2008	20.06.2020	04.10.1994	25.09.2003	11.03.2011
Параметры расчета <i>RTL</i>						
$M_{\min}$	2	2	3	4.3	5	5
$H_1$ , км	0	0	8	0	0	0
$H_2$ , км	150	100	100	150	150	150
$r_0$ , км	20	20	20	50	50	50
$t_0$ , сут	365	365	365	365	365	365
Ограничение по времени, сут	700	700	700	700	700	700
Ограничение по пространству, км	100	100	200	200	200	300
Параметры расчета величины <i>b</i>						
$M_{\min}$	1.8	1.5	1.5	4.5	4	5.4
$H_1$ , км	0	0	0	0	0	0
$H_2$ , км	150	150	8	150	200	200
Расчетное окно, количество событий	200	200	200	110	110	110
Фоновое окно, количество событий	600	600	400	330	330	330
Размер расчетной области, ед. размера очага	7	15	8	7	3	5

Примечания:  $M_{\min}$  – порог селекции по магнитуде снизу;  $H_1$  и  $H_2$  – пороги селекции по глубине;  $r_0$ ,  $t_0$  – параметры алгоритма *RTL* (формулы (2) и (3)). Параметр  $b$  рассчитывался по формулам (6) и (7) в скользящих окнах, содержащих заданное количество событий; в таблице приведены размеры рабочих расчетных окон и фоновых окон, используемых для получения оценки параметра  $Z$  (формула (8)). Размер пространственной области задавался в размерах очага основного землетрясения.

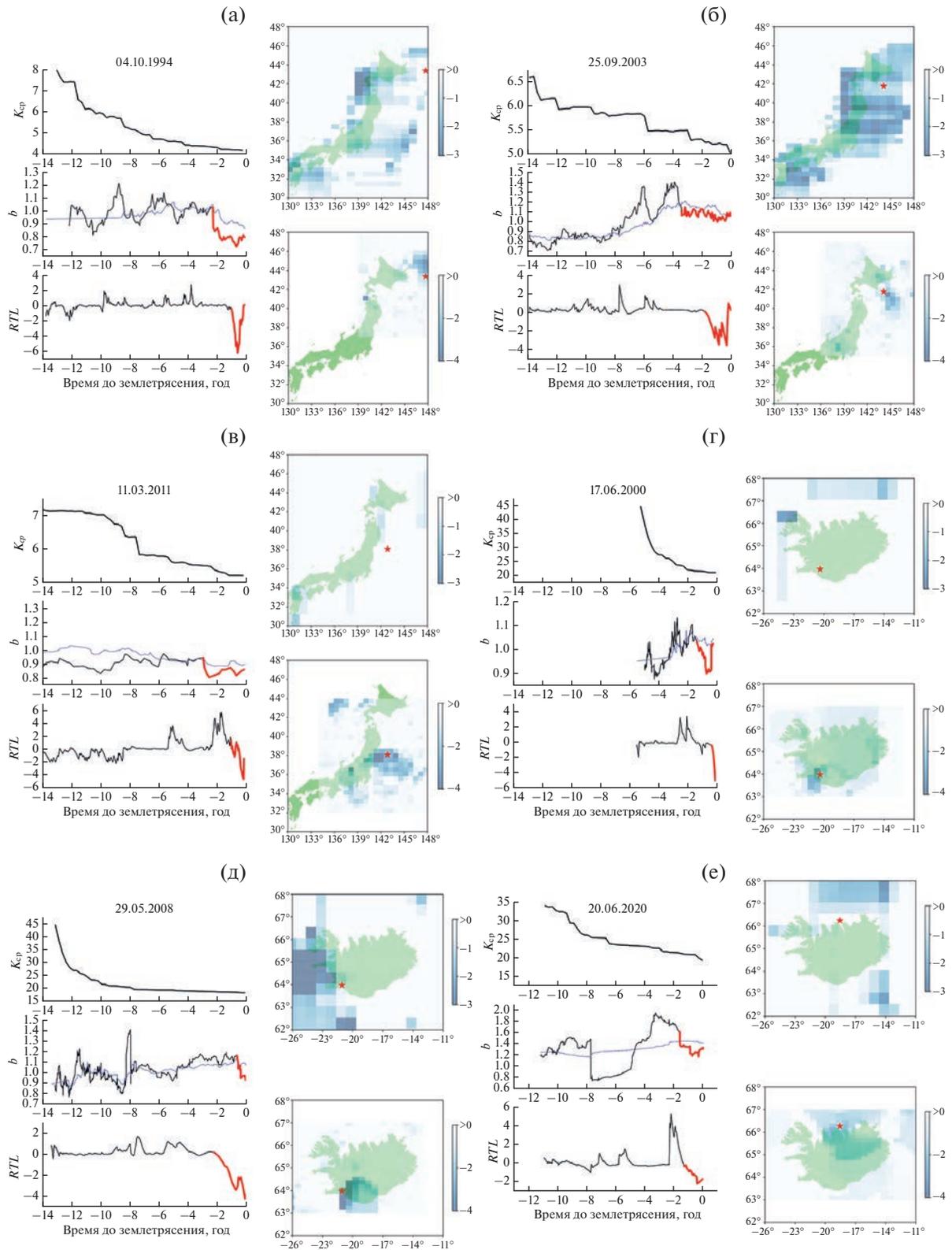
**Таблица 3.** Параметры селекции каталогов и расчетные окна алгоритмов для анализа землетрясений Камчатки

Дата	02.03.1992	08.06.1993	12.11.1993	05.12.1997	20.02.2011	28.02.2013
Параметры расчета <i>RTL</i>						
$K_{\min}$	8.5	9	9	10	10	10
$H_1$ , км	0	0	0	0	0	0
$H_2$ , км	100	200	150	150	150	100
$r_0$ , км	50	50	50	50	50	50
$t_0$ , сут	365	365	365	365	365	365
Ограничение по времени, сут	700	700	700	700	700	700
Ограничение по пространству, км	130	100	150	200	200	100
Параметры расчета величины <i>b</i>						
$K_{\min}$	8	8.5	8.5	9.4	8	8
$H_1$ , км	0	0	0	0	0	0
$H_2$ , км	200	200	200	200	200	200
Расчетное окно, количество событий	100	100	100	180	100	100
Фоновое окно, количество событий	500	400	400	540	300	500
Расчетная область, ед. размера очага	5	6	6	8	3	3

Примечание: Обозначения – те же, что и в табл. 2.



**Рис. 4.** Камчатка: карты распределения исследуемых параметров сейсмического режима в момент наибольшей величины аномалии и графики изменения значений параметра во времени. Карты: верхняя – параметр  $Z$ , нижняя –  $RTL$ ; звездочкой обозначен эпицентр землетрясения, масштаб цветовой шкалы показан справа от карт; (а)–(е) – различные землетрясения; над графиками подписаны их шифры в формате год\_месяц\_день, красным выделены аномалии. На графике параметра  $b$  тонкая линия – значения в фоновых окнах.



**Рис. 5.** Япония (а), (б), (в) и Исландия (г), (д), (е): карты распределения исследуемых параметров сейсмического режима в момент наибольшей величины аномалии и графики изменения значений параметров во времени. Обозначения – как на рис. 4.

**Таблица 4.** Длительности аномалий параметров  $b$ ,  $RTL$  и их разность

Регион	Дата	Магнитуда	Длительность аномалии $b$ $T_b$ , год	Длительность аномалии $RTL$ $T_{RTL}$ , год	$T_b - T_{RTL}$ , год
Камчатка	02.03.1992	6.2	1.42	1.71	-0.29
	08.06.1993	6.4	4.55	2.56	1.99
	12.11.1993	6.2	4.77	3.52	1.25
	05.12.1997	6.6	2.04	1.31	0.73
	20.02.2011	5.9	2.74	2.57	0.17
	28.02.2013	6.5	2.42	2.17	0.25
	<b>Медиана</b>	<b>6.3</b>	<b>2.58</b>	<b>2.36</b>	<b>0.49</b>
Япония	04.10.1994	8.1	2.24	0.98	1.26
	25.09.2003	8.0	3.41	1.79	1.62
	11.03.2011	9.1	2.86	0.95	1.91
	<b>Медиана</b>	<b>8.1</b>	<b>2.86</b>	<b>0.98</b>	<b>1.62</b>
Исландия	17.06.2000	5.5	1.3	0.44	0.86
	29.05.2008	5.3	0.63	2.19	-1.56
	20.06.2020	5.6	1.61	1.32	0.29
	<b>Медиана</b>	<b>5.5</b>	<b>1.3</b>	<b>1.32</b>	<b>0.29</b>

$K_{ср}$ , отвечающие моментам формирования аномалий  $RTL$  и  $b$ . Эти оценки приводятся и обсуждаются ниже.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с “образом предвестника” за время начала аномалий параметров  $RTL$  и  $b$ , выделенных на рис. 4, рис. 5 красным цветом, принималось время начала уменьшения соответствующего параметра. Длительности аномалий (интервалы времени от начала аномалий до момента землетрясения) приведены в табл. 4 и представлены графически на рис. 6.

Из табл. 4 и рис. 6 следует, что длительности аномалий лежат в диапазоне от полугода до нескольких лет, что типично для среднесрочных предвестниковых аномалий [Соболев, 1993; 2011]. Отметим, что в прогностических исследованиях часто за “время аномалии” принимают время от максимума аномалии до землетрясения [Сидорин, 1992; Соболев, 1993; 2011; Соболев, Пономарев, 2003]. В прогностических исследованиях это вполне оправдано, поскольку позволяет более надежно алгоритмизировать автоматическое обнаружение аномалии. Мы же сохраним выбранное нами определение длительности аномалии от ее начала (а не от максимума), поскольку нас интересует физическая сторона формирования аномалии, а не удобство ее использования в практических алгоритмах прогноза землетрясений. Если сопоставлять наши оценки из табл. 4 с “прогностическими” определениями длительности ано-

малии, то наши оценки нужно поделить примерно на два.

В последнем столбце табл. 4 приведена разность длительностей аномалий параметров  $b$  и  $RTL$ . Видно, что для всех землетрясений кроме двух эта разность положительна, т. е. аномалия по значениям  $b$  возникает раньше, чем аномалия  $RTL$ .

Отобранные землетрясения в трех регионах занимают различные диапазоны магнитуд: 5.3–5.6 для Исландии, 5.9–6.6 для Камчатки и 8.0–9.1 для Японии. На рис. 7 представлена сводка средних длительностей аномалий и их разностей в зависимости от средней магнитуды согласно данным табл. 4. Для оценки средних длительностей использована медиана — как более устойчивая оценка при малых объемах выборки.

На рис. 7 видно, что длительности аномалий параметра  $b$  для наиболее слабых землетрясений (Исландия) меньше, чем длительности для более сильных землетрясений Камчатки и Японии. Какие-либо систематические различия длительностей аномалий  $RTL$  не видны. Разница длительностей аномалий  $b$  и  $RTL$  увеличивается с увеличением магнитуды.

Отметим, что небольшая статистика изученных землетрясений не позволяет пока сделать статистически обоснованное заключение о наличии или отсутствии различия длительностей аномалий перед землетрясениями разных магнитуд. Кроме того, мы не можем пока разделить возможные зависимости параметров аномалий от магнитуды и их возможные региональные особенности

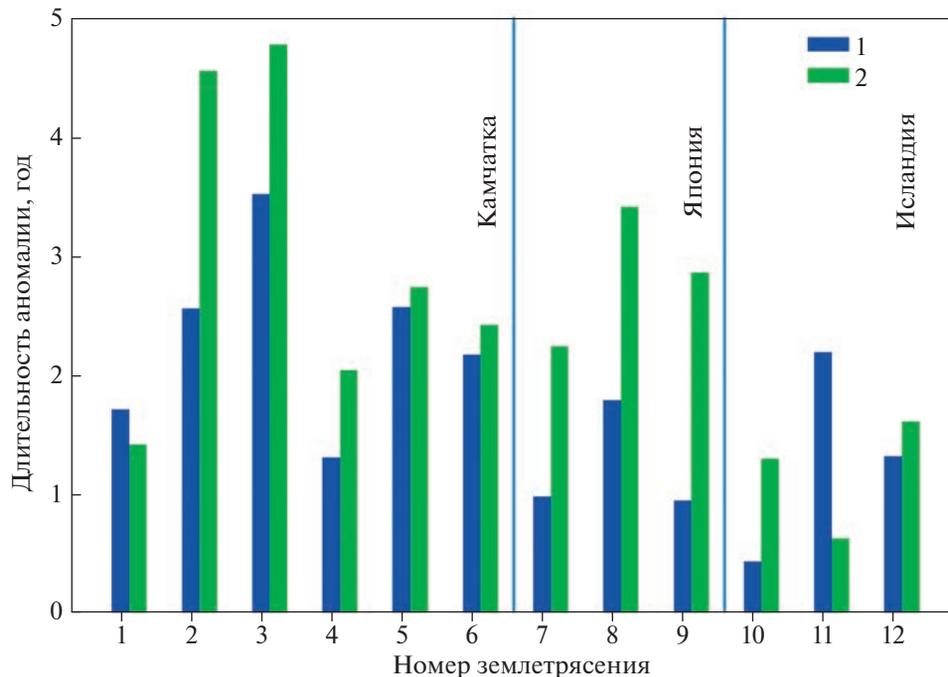


Рис. 6. Длительности аномалий: параметр  $RTL$  (1) и  $b$  (2), согласно табл. 4. По оси абсцисс – номер землетрясения согласно табл. 1.

в зонах субдукции (Камчатка и Япония) и в рифтовой зоне (Исландия).

Выше мы отмечали, что параметр концентрации сейсмогенных разрывов можно рассматривать как показатель неустойчивости системы накапливающихся разрывов. Величина  $K_{cp}$  является, по сути дела, отношением среднего расстояния между существующими разрывами  $R$  к их средней длине  $l_{av}$ . Теоретически две трещины, расположенные на одной линии, теряют устойчивость, когда отношение  $R/l_{av}$  близко к 2. Это определяет теоретическое критическое значения как  $K_{cp}^* \approx 2$ . Зададимся вопросом: при каких значениях  $K_{cp}$  возникают аномалии параметров  $b$  и  $RTL$ ?

В работе [Смирнов, Завьялов, 1996] показано, что оценки значений  $K_{cp}$ , и соответственно, критические значения  $K_{cp}^*$  в момент землетрясения, полученные по формуле (9), зависят от соотношения размера ячейки осреднения и размера очага землетрясения. Показатель этой масштабной зависимости определяется фрактальной размерностью множества гипоцентров землетрясений. В частности, варьируя отношение размеров ячейки и очагов землетрясений, авторы [Смирнов, Завьялов, 1996] обнаружили, что в районе Камчатки критические значения  $K_{cp}^*$  перед одними и теми же землетрясениями изменяются более, чем в три раза.

Исходя из необходимости статистической обеспеченности оценок, в настоящем исследова-

нии значения  $K_{cp}$  рассчитывались для разных землетрясений при различных соотношениях размера ячейки и очага землетрясения. При этом мы не оценивали и не учитывали масштабную зависимость, поэтому сравнивать значения  $K_{cp}$ , приходящиеся на начала аномалий  $b$  и  $RTL$  для разных землетрясений и для разных регионов, нельзя. Сопоставлять можно отношения значений  $K_{cp}$ , приходящихся на время начала аномалии, к критическому значению  $K_{cp}^*$  в момент основного землетрясения. Это отношение исключает зависимость оценки (9) от размера ячейки и очага землетрясения. Соответствующие отношения приведены в табл. 5.

В таблице 5 видно, что значения  $K_{cp}$  в моменты возникновения аномалий  $b$  и  $RTL$  в среднем отличаются от критических значений  $K_{cp}^*$  (превосходят их) не более, чем на 5%. В последнем столбце таблицы 6 приведен диапазон изменения  $K_{cp}$  в пределах соответствующего сейсмического цикла – отношение  $K_{cp}$  в начале цикла к  $K_{cp}^*$ . Это отношение в среднем около 4, т.е. составляет 400%. Тем самым, отличие значений  $K_{cp}$  от критических  $K_{cp}^*$  на величину менее 5%, можно считать малым. Это означает, что аномалии по значениям параметров  $b$  и  $RTL$  возникают, когда концентрация сейсмогенных разрывов близка к критическому значению.

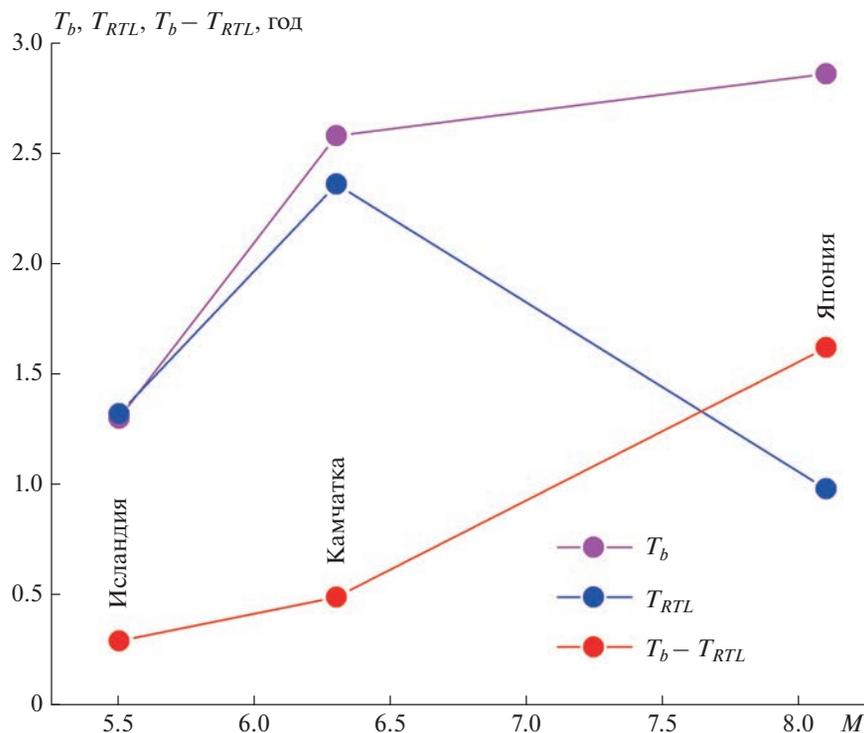


Рис. 7. Средние (медианые) длительности аномалий параметров  $b$  ( $T_b$ ) и  $RTL$  ( $T_{RTL}$ ) и их средняя (медианная) разность (по данным табл. 5).

Таблица 5. Соотношение значений концентраций сейсмогенных разломов.  $K_{CP}$  в моменты начала аномалий  $b$  и  $RTL$  и в момент времени землетрясения

Регион	Дата	Магнитуда	$K_{cp}^b / K_{cp}^*$	$K_{cp}^{RTL} / K_{cp}^*$	$K_{cp}^0 / K_{cp}^*$
Камчатка	02.03.1992	6.2	1.026	1.031	4.01
	08.06.1993	6.4	1.025	1.014	6.55
	12.11.1993	6.2	1.037	1.029	4.87
	05.12.1997	6.6	1.015	1.009	4.89
	20.02.2011	5.9	1.019	1.016	4.42
	28.02.2013	6.5	1.010	1.009	7.63
Япония	04.10.1994	8.1	1.041	1.010	1.93
	25.09.2003	8.0	1.094	1.044	2.91
	11.03.2011	9.1	1.056	1.002	3.83
Исландия	17.06.2000	5.5	1.026	1.002	2.14
	29.05.2008	5.3	1.010	1.023	2.44
	20.06.2020	5.6	1.098	1.083	4.00
<b>Среднее</b>			<b>1.038</b>	<b>1.023</b>	<b>4.14</b>

Примечания:  $K_{cp}^*$  – критическое значение  $K_{cp}$  в момент землетрясения;  $K_{cp}^b$  – значение  $K_{cp}$  в момент начала аномалии параметра  $b$ ;  $K_{cp}^{RTL}$  – значение  $K_{cp}$  в момент начала аномалии  $RTL$ ;  $K_{cp}^0$  – значение  $K_{cp}$  в начале сейсмического цикла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных региональных каталогов землетрясений позволил выявить аномалии сейсмического режима перед землетрясениями различ-

ных магнитуд в областях с двумя генеральными тектоническими типами: в зоне субдукции (каталоги Камчатки и Японии) и в рифтовой зоне (Исландия).

Сопоставление длительностей аномалий наклона графика повторяемости  $b$  и параметра  $RTL$  позволило выявить стадийность их проявления. Аномалии параметра  $b$  в целом обнаруживаются раньше, чем аномалии  $RTL$ . Вопрос о природе и механизмах формирования такой стадийности является открытым, но мы выскажем наши предположения на эту тему.

Аномалии наклона графика повторяемости  $b$  отражают изменение энергетического спектра сейсмичности. Уменьшение значений  $b$  свидетельствует об увеличении доли более сильных событий и уменьшение доли более слабых. С точки зрения физики процесса подготовки очага землетрясения, в рамках концепции ЛНТ и сходных с ней концепций слияния и роста трещин это перераспределение связывают с образованием более крупных разрывов за счет усиления взаимодействия разрывов при увеличении их концентрации за счет большего перекрытия вызванных разрывами аномалий поля напряжений.

Аномалии  $RTL$  отражают формирование сейсмических затиший и последующую форшоковую активизацию сейсмичности. В рамках концепции ЛНТ образование сейсмических затиший в диапазоне относительно слабых землетрясений и последующую форшоковую активизацию связывают как с перераспределением процесса разрушения с младших масштабов на старшие, так и с локализацией разрушения — разделением метастабильной области очага будущего землетрясения на “пассивную” и “активную” части. Локализация разрушения запускает лавинообразный процесс разрушения в ослабленной зоне, развитие разрушения ведет к дальнейшему уменьшению прочности этой зоны и, как следствие, к дальнейшей лавинообразной активизации разрушения [Соболев, 1993].

Полученные нами результаты указывают на то, что процесс локализации формируется позже, чем начинает меняться энергетический спектр сейсмичности. Возможно, что эта задержка увеличивается с увеличением магнитуды землетрясения, поскольку на рис. 5 мы видим увеличение различия длительностей аномалий наклона графика повторяемости и  $RTL$  с увеличением магнитуды землетрясения.

Сопоставление времен возникновения аномалий сейсмического режима (наклона графика повторяемости  $b$  и  $RTL$ ) с соответствующими этим временам значениями параметра концентрации сейсмогенных разрывов свидетельствует, что формирование аномалий сейсмического режима происходит, когда состояние системы сейсмогенных разрывов практически достигло критического значения в сейсмическом цикле.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 23-27-00067 “Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед сильными землетрясениями”.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием данных (региональный каталог землетрясений Камчатки), полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С.* К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С.* Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. Физические процессы в очагах землетрясений. М.: ИФЗ им. О.Ю. Шмидта. 1980. С. 78–86.
- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.
- Кендалл М., Стьюарт А.* Статистические выводы и связи. М.: Наука. 1973. 900 с.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б. и др.* Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли. 2010. № 3. С. 3–16.
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Основы физики очага и предвестники землетрясений. Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 6–29.
- Петрушов А.А., Смирнов В.Б.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2022611056. 2022.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В.* О зависимости энергии землетрясения от объема сейсмического очага // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 598–602.
- Салтыков В.А., Коновалова А.А.* Мониторинг вариаций наклона графика повторяемости землетрясений Камчатки: методы и примеры. Проблемы Комплексного геофизического мониторинга ДВ России. Труды Второй региональной научно-технической конференции / В.Н. Чебров (ред.). Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. 2010. С. 235–238.
- Салтыков В.А., Кузнецов Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А.* Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.
- Сидорин А.А.* Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 191 с.
- Смирнов В.Б., Завьялов А.Д.* Концентрационный критерий разрушения с учетом фрактального распределения разрывов // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 75–80.

- Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // *Физика Земли*. 2012. № 7–8. С. 63–88.
- Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
- Смирнов В.Б., Отти С., Потанина М.Г., Михайлов В.О., Петров А.Г., Шапиро Н.М., Пономарев А.В. Оценки параметров цикла разрушения литосферы по данным региональных каталогов землетрясений // *Физика Земли*. 2019. № 5. С. 3–21.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН. 2011. 56 с.
- Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 166–179.
- Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.
- Соболев Г.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // *Докл. АН СССР*. 1980. Т. 252. № 1. С. 69–71.
- Соболев Г.А., Пономарёв А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С., Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. Способ среднесрочного прогноза землетрясений // *Докл. РАН*. 1996. Т. 347. № 3. С. 405–407.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2013. № 1. С. 18–40.  
<https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // *Геофизические исследования*. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91.  
<https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- Aki K. Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\lg N = a - bM$  and its confidence limits // *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.* 1965. V. 43. P. 237–239.
- Kali R., Zaytsev A., Burnaev E. Recurrent Convolutional Neural Networks help to predict location of Earthquakes // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* PP. 2021. V. 99. P. 1–5.
- Miachkin V.I., Sobolev G.A., Dolbilkina N.H. et al. The study of variations in geophysical fields near focal zones of Kamchatka // *Tectonophysics*. 1972. V. 14. № 3. P. 287–293.
- Mjachkin V.I., Brace W.F., Sobolev G.A., Dietrich J.H. Two models for earthquake forerunners // *PAGEOPH*. 1975. V. 113. P. 169–181.
- Nagao T., Takeuchi A., Nakamura K. A new algorithm for the detection of seismic quiescence: Introduction of the RTM algorithm, a modified RTL algorithm // *Earth Planets and Space*. 2011. V. 63. P. 315–324.  
<https://doi.org/10.5047/eps.2010.12.007>
- Panza G.F., Kossobokov V.G., Laor E., De Vivo B. Earthquakes and sustainable infrastructure. Elsevier, 2022. 648 p.
- Proskura P., Zaytsev A., Braslavsky I., Egorov E., Burnaev E. Usage of Multiple RTL Features for Earthquakes Prediction. *Computational Science and Its Applications*. ICCSA 2019. ICCSA 2019. Lecture Notes in Computer Science. V. 11619. Springer. Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-24289-3\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24289-3_41)
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis // *Science*. 1973. V. 181. P. 803–809.
- Stefansson R. *Advances in earthquake prediction*. Springer. 2011. 245 p.
- Zhang Y., Huang Q. Seismicity Changes before Major Earthquakes in Sichuan, China, Revealed by a Combination of the RTL Algorithm and ETAS Model // *Seismological Research Letters*. 2022 V. 94 (2A). P. 844–851.  
<https://doi.org/10.1785/0220220282>

## Staging of Occurrence of Seismicity Anomalies before Earthquakes in Kamchatka, Japan and Iceland

V. B. Smirnov<sup>a, b, \*</sup> and A. A. Petrushov<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Physics Department, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

\*e-mail: vs60@mail.ru

**Abstract**—The paper presents the results of a study showing that anomalies in the seismic regime parameters before earthquakes of various magnitudes occur in stages. The occurrence in stages means the correlation between the times of formation and development of anomalies in various seismic regime parameters. Earthquakes in regions with two general types of tectonics are selected for analysis: in the subduction zone (Kamchatka and Japan) and in the rift zone (Iceland). The selection of regions is primarily based on the availability and quality of regional seismic catalogs. GR  $b$ -value and the composite parameter known as the *RTL* are used as the seismic regime parameters. The detection of spatiotemporal anomalies before the selected earthquakes is based on the known “precursory patterns” of the seismic regime parameters. Comparing the durations of the detected anomalies shows that the anomalies of  $b$ -value generally occur earlier than the *RTL* anomalies. Possible reasons why the anomalies occur in stages are suggested. In the vicinity of the studied earthquakes, a change in the seismogenic rupture concentration parameter within the corresponding seismic cycles is also estimated. Comparing the times at which the detected seismic regime anomalies occur with the values of the seismogenic rupture concentration parameter corresponding to these times shows that the formation of seismic regime anomalies occurs at a stage when the system of seismogenic ruptures accumulated during the seismic cycle has almost reached its critical value.

**Keywords:** seismic regime, seismic anomalies, occurrence in stages