

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ КАЛИФОРНИИ

© 2024 г. А. А. Петрушов^{1,2, *}, В. Б. Смирнов^{1,2},
В. О. Михайлов^{1,2}, С. А. Фомина¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: petrushov.aa18@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024 г.

После доработки 10.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

Перед 15 наиболее сильными землетрясениями Калифорнии с магнитудами $M \geq 6.5$ за 1984–2023 гг. проведен анализ аномалий сейсмического режима по двум параметрам: наклон графика повторяемости и функция *RTL*. Выявление пространственно-временных аномальных областей проводилось на основе известных для этих параметров образов предвестников. Представлены значения настроечных коэффициентов алгоритмов расчета и параметров фильтрации каталогов, выбранных для анализа каждого землетрясения. Для аномалий определены их характеристики (длительность, размер, расстояние от центра аномалии до эпицентра землетрясения). Сравнение длительностей аномалий показало, что для большинства землетрясений аномалии параметра *RTL* возникают раньше, чем аномалии наклона графика повторяемости. Полученная очередность возникновения аномалий отличается от очередности, обнаруженной авторами ранее при анализе сильных землетрясений в зонах субдукции и рифтовой зоне. Значительная доля из исследованных в Калифорнии землетрясений происходит с задержкой в несколько месяцев после завершения бухтообразных аномалий параметра *RTL*, отражающих завершение формирования метастабильной области среды. При этом аномально низкие значения наклона графика повторяемости сохраняются вплоть до момента землетрясения.

Ключевые слова: сейсмический режим, сейсмические аномалии, стадийность, сдвиговая зона.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050084>, **EDN:** EJVCWN

ВВЕДЕНИЕ

В работе [Смирнов, Петрушов, 2023] был проведен анализ аномалий сейсмического режима перед рядом землетрясений в зонах субдукции и в рифтовой зоне. Аномалии выявлялись и анализировались в пространственно-временных окрестностях выбранных землетрясений. Для выделения аномалий перед землетрясениями использовались известные образы предвестников. В качестве параметров сейсмического режима рассматривались наклон графика повторяемости и комплексный параметр, известный как *RTL*.

Длительности выявленных в работе [Смирнов, Петрушов, 2023] аномалий лежат в диапазоне от полугода до нескольких лет, что типично для среднесрочных предвестниковых аномалий.

Пространственные размеры аномалий для большинства землетрясений в 3–4 раза превосходят размеры очагов землетрясений, что характерно для предвестников физического типа. Инструментальный очаг (точка начала вспарывания разрыва в очаге) расположен, как правило, на краю аномалии.

Сопоставление длительностей аномалий наклона графика повторяемости и параметра *RTL* позволило выявить стадийность их проявления. Под стадийностью понимается соотношение времен возникновения аномалий. Для исследованных землетрясений как в зоне субдукции, так и в рифтовой зоне оказалось, что аномалии наклона графика повторяемости возникают, в большинстве случаев, раньше, чем аномалии *RTL*.

Исследования в работе [Смирнов, Петрушов, 2023] были выполнены на примере областей, относящихся к двум из трех генеральных тектонических типов: в зоне субдукции (Камчатка и Япония) и в рифтовой зоне (Исландия). Цель настоящей работы – выявление аномалий сейсмического режима и исследование стадийности их проявления в области третьего генерального типа, в зоне сдвиговых разломов, по данным сейсмических каталогов Северной и Южной Калифорнии.

В работе [Соболев, 2003] отмечено отличие характера проявления аномалий *RTL* двух землетрясений в Калифорнии от землетрясений в зонах субдукции (Камчатка, Сахалин, Япония). В настоящей работе приводятся результаты анализа 15 наиболее сильных землетрясений Калифорнии (с магнитудами более 6.5) за 1984–2023 гг., сопоставляются аномалии параметра *RTL* и наклона графика повторяемости. Как и в предыдущих публикациях [Смирнов, Петрушов, 2023; Смирнов и др., 2023] авторы анализируют аномалии непосредственно перед исследуемыми землетрясениями, не рассматривая отдельно природу аномалий, возникающих в другие периоды времени.

ВЫБРАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Параметры сейсмического режима косвенно характеризуют процессы, происходящие в сейсмоактивной области литосферы. Анализ изменения параметров в пространстве и времени в ряде случаев позволяет выявить характерные изменения, предшествующие сильным землетрясениям в ходе их подготовки. Используемые в настоящей работе параметры сейсмического режима – наклон графика повторяемости (*b-value*) и комплексный параметр *RTL* по своей физической сути опираются на модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), однако учитывают разные факторы процесса подготовки землетрясения. Ниже представлена краткая характеристика используемых параметров.

Наклон графика повторяемости. С физической точки зрения, график повторяемости, который строится для определенного диапазона магнитуд, характеризует распределение землетрясений по энергиям (энергетический “спектр” сейсмичности). Его изменение во времени отражает изменение частоты (вероятности) возникновения землетрясений различных магнитуд в выбранной пространственной области. Наклон графика повторяемости, также

известный как параметр Гутенберга–Рихтера или *b-value*, характеризует соотношение частот возникновения землетрясений различных энергий. Согласно модели ЛНТ при подготовке землетрясения в некоторой области разрушающейся среды происходит процесс увеличения размеров сейсмогенных разрывов – переход на более крупный масштаб трещинообразования [Соболев, 2019]. Этот этап связан с разрушением и слиянием меньших разрывов, когда они расположены на критическом расстоянии друг от друга (достигнута критическая концентрация). Данный процесс отражается на энергетическом спектре землетрясений: доля более сильных землетрясений увеличивается, а более слабых – уменьшается, что влечет за собой падение значений наклона графика повторяемости. Следовательно, образ предвестника для параметра *b-value* – падение значений перед сильным землетрясением (в ряде случаев падению значений предшествует относительно небольшой рост, см. более подробно работу [Смирнов, Петрушов, 2023] и ссылки в ней).

Будучи классическим параметром, *b-value* активно применяется для анализа сейсмического режима по всему миру. Для наклона графика повторяемости мы используем оценку максимального правдоподобия, учитывающую ограниченность диапазона магнитуд в выборке [Потанина и др., 2011; Смирнов, Пономарев, 2020]. Для расчета применялось авторское открытое программное обеспечение *PyBvalue*¹.

Параметр RTL. Комплексный параметр *RTL* разработан для выявления стадий сейсмического затишья и форшоковой активизации, которые, как правило, сопровождают процесс подготовки землетрясений [Соболев, Тюпкин, 1996]. Применение параметра позволяет выявлять аномалии затишья и форшоковой активизации как в ретроспективном анализе (см., например, работы [Салтыков и др., 2013; Смирнов, Петрушов, 2023; Смирнов и др., 2023] и ссылки в них), так и в режиме реального времени².

Параметр *RTL* рассчитывается в каждой точке пространства и в каждый момент времени, представляя собой суммарное “сейсмовыделение”. Функция *RTL* учитывает каждое произошедшее до текущего момента времени землетрясение со своим весом. Этот вес зависит от удаленности от конкретного землетрясения до точки расчета во времени и пространстве, а также от размера его

¹ <https://gitlab.com/Mr.Brain/py-bvalue>

² <http://www.emsd.ru/alarm/kf-res-pz;> <http://www.emsd.ru/265-methods-eq>

очага. Таким образом, параметр RTL характеризует влияние землетрясений на разрушающуюся среду [Смирнов, Пономарев, 2020]. Степень этого влияния определяется задаваемыми коэффициентами алгоритма расчета RTL и может быть различной для разных сейсмоактивных регионов. Образом предвестника является бухтообразное поведение во времени: перед сильным землетрясением сначала наблюдается спад значений RTL (стадия затишья), за которым следует их увеличение (форшоковая активизация) [Соболев, 2019]. Такое поведение параметра принимают за аномалию, однако иногда стадии повышения RTL может не произойти. Также после стадии повышения значений может возникать задержка, за которой последует сильное землетрясение [Соболев, 2011; 2015].

Для расчета параметра RTL использовалось авторское открытое программное обеспечение PyRTL³.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Расчет параметров сейсмического режима производится для заданной области, покрытой прямоугольным равномерным растром, формирующим расчетную сетку 50×50 точек. В каждой точке рассчитывается временной ход параметров, при этом полученные значения можно представить в виде пространственных карт для выбранного момента времени. Карты состоят из прямоугольных ячеек с центрами в точках раstra. Подробное описание процедуры оценки параметров приведено в работе [Смирнов, Петрушов, 2023], ниже представлены основные аспекты.

Согласно работам [Соболев и др., 1996; Соболев, Тюпкин, 1998] параметр RTL рассчитывается как произведение трех функций:

$$RTL = R \cdot T \cdot L \quad (1)$$

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

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

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

Значение RTL рассчитывается для заданной пространственной точки $S = \{x, y, z\}$ и на

³ <https://gitlab.com/Mr.Brain/PyRTL>

определенный момент времени t . Здесь: r_i – расстояние от i -го землетрясения до точки S ; 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, которые подбираются эмпирически при настройке алгоритма на региональные особенности сейсмичности и магнитудный диапазон исследуемых землетрясений по контрастности выявляемой аномалии. Поправки R_s , T_s и L_s введены для удаления линейных трендов во времени каждой из трех функций. Рассчитанные по формуле (1) значения RTL нормируются на величину своего стандартного отклонения, оцененного в определенном пространственно-временном окне. Процедура расчета значения RTL для заданного момента времени делится на несколько этапов: расчет значений функций R , T и L и удаление их линейного тренда (формулы (2)–(4)), перемножение функций R , T , L , нормировка полученного значения RTL на его стандартное отклонение.

Существует ряд особенностей, касающихся оценивания наклона графика повторяемости [Смирнов, Пономарев, 2020; Писаренко и др., 2023]. В настоящей работе для получения оценки b -value проводится расчет оценки максимального правдоподобия для негруппированной выборки [Aki, 1965; Кендалл, Стьюарт, 1973], затем производится оценка максимального правдоподобия для цензурированной выборки. В качестве итогового значения берется среднее двух оценок, рассматриваемых как оценки сверху и снизу [Смирнов, Пономарев, 2020].

Для выявления аномалий параметра b часто используется метод Z -test [Салтыков, Коновалова, 2010; Салтыков и др., 2013] и одноименный параметр Z . Эта величина показывает, насколько текущее значение наклона графика повторяемости отличается от его фонового значения с учетом погрешностей оценок. Для расчета параметра Z необходимо иметь оценку наклона графика повторяемости в двух временных окнах – одно (меньшее) отвечает текущему его значению, а второе (большее) – фоновому:

$$Z = \frac{b_2 - b_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}, \quad (5)$$

где b_1 и b_2 – значения наклонов графика повторяемости в фоновом и текущем окнах, соответственно; σ_1^2 и σ_2^2 – дисперсии (квадраты погрешностей) оценок b_1 и b_2 .

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных использованы релоцированные каталоги землетрясений Северной и Южной Калифорнии. Каталоги загружались из открытых источников сети Интернет в специализированные авторские базы данных (БД), средствами которых осуществлялся контроль качества и первичный анализ данных [Смирнов, Пономарев, 2020]. Идентификация афтершоков проводилась по методике из работы [Смирнов, 2009], основанной на алгоритме Молчана–Дмитриевой [Молчан, Дмитриева, 1991]. Оценка представительной магнитуды и ее изменений во времени и пространстве – по авторской методике из работы [Смирнов, 1997] на основе алгоритма Писаренко [Писаренко, 1989].

В БД Северной Калифорнии загружено 821 389 записей релоцированного каталога землетрясений Северной Калифорнии DDRT (Real-time double-difference earthquake locations for Northern California)⁴ за интервал времени 01.01.1984–14.01.2023 гг. с магнитудами $M \geq -0.9$. Очистка каталога DDRT от взрывов производилась по данным каталога NCEC Northern California Earthquake Catalog⁵, подвыборка “Double-Difference Catalog 1984–”, ключевой идентификатор событий которого совпадает с ключевым идентификатором каталога DDRT. Сопоставление двух каталогов показало, что в исходном каталоге DDRT имеются записи о взрывах в интервале времени 2007–2020 гг., эти записи не помечены в DDRT как взрывы, но помечены в каталоге NCEC. Афтершоки идентифицировались для главных событий $M_{4.5}+$. После удаления афтершоков объем рабочего каталога составил 625 937 записей.

В БД Южной Калифорнии загружено 800 499 записей релоцированного каталога землетрясений Южной Калифорнии RSCSN (Wave form Relocated Earthquake Catalog for Southern California (1981 to 2022))⁶ за интервал времени 01.01.1981–31.03.2022 гг. с магнитудами $M \geq -1$ (данные за более поздний интервал времени в первоисточнике не представлены). Каталог RSCSN сформирован составителями по методике из работы [Hauksson et al., 2012]. Афтершоки идентифицировались для главных событий $M_{4.5}+$. После удаления афтершоков объем рабочего каталога составил 542 423 записи.

В обоих каталогах используется составная шкала магнитуд, унифицированная составителями каталогов.

На рис. 1 показаны оценки изменения представительной магнитуды каталогов во времени. Исходя из этого рисунка мы выделили две эпохи: с начала каталогов по 1995 г. включительно и с 1996 г. до конца каталогов. В первую эпоху представительная магнитуда выходит за уровень $M_c = 2$, и видны достаточно значительные ее увеличения в начале эпохи. Во вторую эпоху представительная магнитуда колеблется или уменьшается, не превосходя значения $M_c = 2$. В соответствии с этим пространственные распределения представительной магнитуды были оценены отдельно для первой и второй эпох (рис. 2).

На рис. 2 видно, что значения представительной магнитуды выходят за уровень $M_c = 2$ на периферии областей, покрываемых данными сейсмических каталогов, но нигде не превышают уровень $M_c = 3$. На рис. 2 также показаны эпицентры землетрясений, которые были подвергнуты анализу в настоящей работе. Селекция по магнитуде при расчете изменений параметров сейсмического режима перед землетрясениями производилась с учетом оценок представительности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 приведены характеристики отобранных землетрясений, их эпицентры показаны на рис. 3.

Для каждого из исследуемых землетрясений строились пространственные карты распределения параметров RTL и b для последовательных моментов времени, предшествующих землетрясению. С целью более четкого выделения пространственной области аномалий для параметра b строились карты оценки его вариаций по методу Z -test. Для построенных карт визуально выделялась аномалия, соответствующая землетрясению, и в ее центре строился временной график для каждого из параметров. Область построения временных графиков заканчивалась моментом времени за несколько дней до землетрясения. Следует отметить, что для некоторых землетрясений обнаруживалось несколько пятен аномалий на картах. В таких случаях выбиралось то пятно, центр которого находился ближе к эпицентру землетрясения. Если же пятна были сопоставимы по удаленности от эпицентра, то

⁴ <http://ddrt.ldeo.columbia.edu/DDRT/index.html>

⁵ <https://ncedc.org/ncedc/catalog-search.html>

⁶ <https://scedc.caltech.edu/data/alt-2011-dd-hauksson-yang-shearer.html>

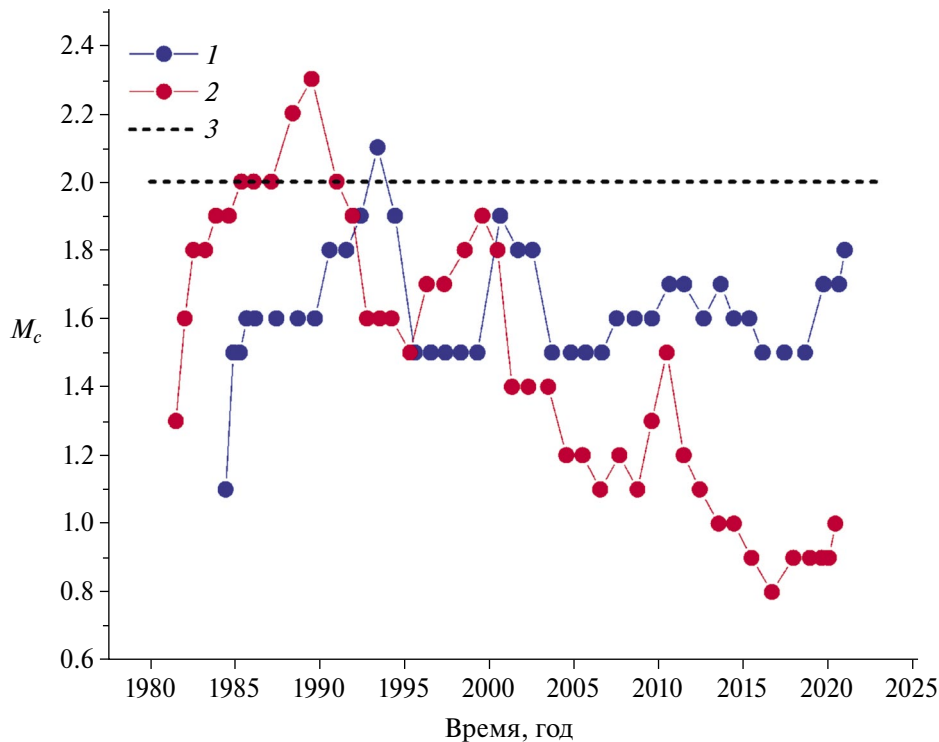


Рис. 1. Изменение представительной магнитуды каталогов Северной 1 и Южной 2 Калифорнии во времени. Прямая 3 показывает уровень представительной магнитуды $M_c = 2$.

выбиралось пятно, которое лучше обеспечено статистически.

При расчете значений RTL для всех событий использовались единые параметры предварительной фильтрации каталога и одинаковые расчетные коэффициенты. Пороговая минимальная магнитуда взята равной 3. С одной стороны, землетрясения $M \geq 3$ + представительны во всей исследуемой области. С другой – разница между магнитудами главных событий и порогом $M = 3$ составляет несколько единиц магнитуд, что соответствует физическим требованиям к выбору диапазона магнитуд для отыскания затихий перед сильными землетрясениями [Соболев, Пономарев, 2003]. Поскольку вследствие специфических термодинамических условий сейсмичность Калифорнии является мелкофокусной [Brace, Byerlee, 1970; Scholz, 2019; Molnar, 2020], дополнительная фильтрация каталогов по глубине не проводилась. Расчетный радиус⁷ равен 130 км. Коэффициенты в выражениях (2)–(3) принимают следующие значения: $r_0 = 50$ км, $t_0 = 1$ год. Коэффициент p выбран равным 1 и с физической точки зрения

⁷ Расчетный радиус – радиус окружности, соответствующей области, события из которой учитываются при расчете сейсмического параметра в заданной точке.

соответствует суммированию подвижек в очагах землетрясений [Смирнов, Пономарев, 2020]. Данные значения параметров выбраны исходя из опыта применения алгоритма для различных сейсмоактивных регионов. Значение постоянной l_0 в данной реализации алгоритма не влияет на результаты расчета. Для расчета значений b параметры предварительной фильтрации каталога различаются в зависимости от исследуемого землетрясения. Пороговая магнитуда выбиралась исходя из оценок представительности каталогов в пространственно-временной окрестности главных событий согласно рис. 2. Текущее и фоновое временные окна, расчетный радиус выбиралась исходя из статистических соображений. Параметры фильтрации для расчета b -value представлены в табл. 2.

На рис. 4–рис. 6 представлены карты аномалий исследуемых параметров в момент времени наибольшей величины аномалии и соответствующие временные графики. По оси времени отложены годы до исследуемого землетрясения. Функция RTL выражена в единицах своего долговременного стандартного отклонения. При построении пространственных карт положительные аномалии не выделялись цветом, а отрицательные ограничивались значением -2 , отвечающим выходу аномалии за двухсигмовый

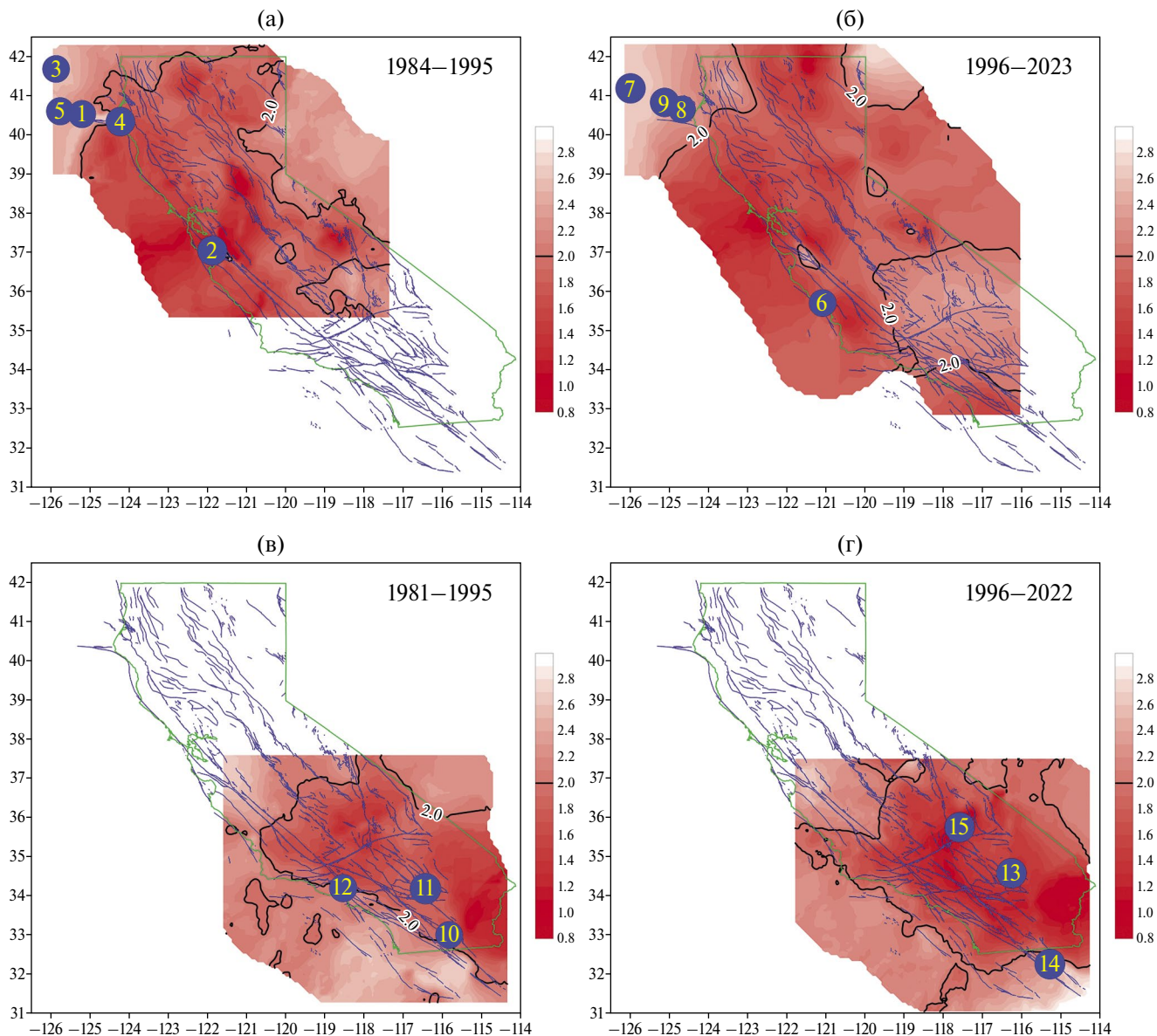


Рис. 2. Изменения представительной магнитуды каталогов Северной (а), (б) и Южной (в), (г) Калифорнии в пространстве для двух эпох (соответствующие годы подписаны на рисунках). Показаны основные четвертичные разломы. Зеленым показана граница штата Калифорния. Синими кружками показаны эпицентры землетрясений, которые анализируются в настоящей работе, номера соответствуют данным табл. 1.

интервал, как для функции *RTL*, так и для значений по методу *Z-test*. Красным цветом на временных графиках показаны аномалии *RTL* и параметра *b*, выделяемые визуально согласно образцам предвестников.

За начало аномалии принималось время начала уменьшения соответствующего параметра перед исследуемым землетрясением. В работе [Соболев, 2003] было замечено, что величина аномалии может меняться при изменении длительности предшествующего временного ряда. Наши методические исследования

подтверждают это. Стандартное отклонение величины *RTL*, рассчитанное во временном окне за интервал времени, предшествующий землетрясению, часто увеличивается с увеличением размера окна вследствие нестационарности сейсмического процесса. Такие эффекты хорошо известны для подобных временных рядов [Mandelbrot, 1983]. Соответственно, и нормированное на стандартное отклонение значение *RTL* оказывается разным по величине при варьировании размера нормировочного окна. В связи с этим при выделении начала

Таблица 1. Характеристики выбранных землетрясений

Номер	Дата	Долгота	Широта	Глубина	Магнитуда
1	10.09.1984	–125.205	40.53	6.39	6.6
2	18.10.1989	–121.878	37.042	16.45	7
3	17.08.1991	–125.87	41.684	2.81	6.5
4	25.04.1992	–124.224	40.338	10.62	6.9
5	19.02.1995	–125.764	40.604	4.77	6.6
6	22.12.2003	–121.097	35.701	7.88	6.5
7	15.06.2005	–126.002	41.187	4.51	7.1
8	10.01.2010	–124.689	40.65	20.94	6.5
9	10.03.2014	–125.134	40.829	16.64	6.9
10	24.11.1987	–115.829	33.017	12.4	6.6
11	28.06.1992	–116.435	34.201	6.59	7.3
12	17.01.1994	–118.537	34.213	19.11	6.7
13	16.10.1999	–116.272	34.596	7.66	7.1
14	04.04.2010	–115.294	32.274	13.99	7.2
15	06.07.2019	–117.597	35.77	1.54	7.1

аномалии мы не опирались на величину аномалии, а руководствовались только ее формой (образом предвестника) и ее наличием перед исследуемым землетрясением. Тем самым мы не рассматривали в этой работе вопрос об отсутствии аномалий перед землетрясениями (перед всеми землетрясениями Калифорнии $M6.5+$ за исследуемый интервал времени аномалии были обнаружены) или о наличии “ложных” аномалий.

По результатам расчетов параметров сейсмического режима и выделенным аномалиям, представленным на рис. 4–рис. 6, для каждого землетрясения оценены характеристики зарегистрированных перед ним аномалий: длительность, пространственный размер, расстояние от эпицентра до центра аномалии – табл. 3, табл. 4. Средний размер аномалий составил 230 км для параметра RTL и 290 км для параметра b . Поскольку диапазон магнитуд исследованных землетрясений невелик (6.5–7.3), не удастся выявить связь размера аномалии с магнитудой землетрясения и, соответственно, размером его очага.

В среднем расстояние от эпицентра землетрясения до центра аномалии RTL составляет 51% от ее размера. А для аномалии параметра Z эта величина составляет 79%. Эти значения согласуются с наблюдаемым ранее явлением: эпицентры будущих землетрясений часто располагаются на краю аномальной области или на небольшом удалении от ее края [Соболев, 2003; Соболев, Пономарев, 2003].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Длительности выявленных аномалий RTL лежат в диапазоне от 3 месяцев до 2.8 лет (медиана 1.7 лет), длительность аномалий b – в диапазоне от 4 месяцев до 2.4 лет (медиана 1 год). Эти длительности соответствуют типичным значениям для среднесрочных предвестниковых аномалий [Соболев, 1993; 2011]. Отметим, что, как и в работе [Смирнов, Петрушов, 2023], мы отсчитывали длительность аномалии от начала ее формирования, выделяемого согласно образу предвестника, а не от максимума, как это часто делают в прогнозных исследованиях [Сидорин, 1992;

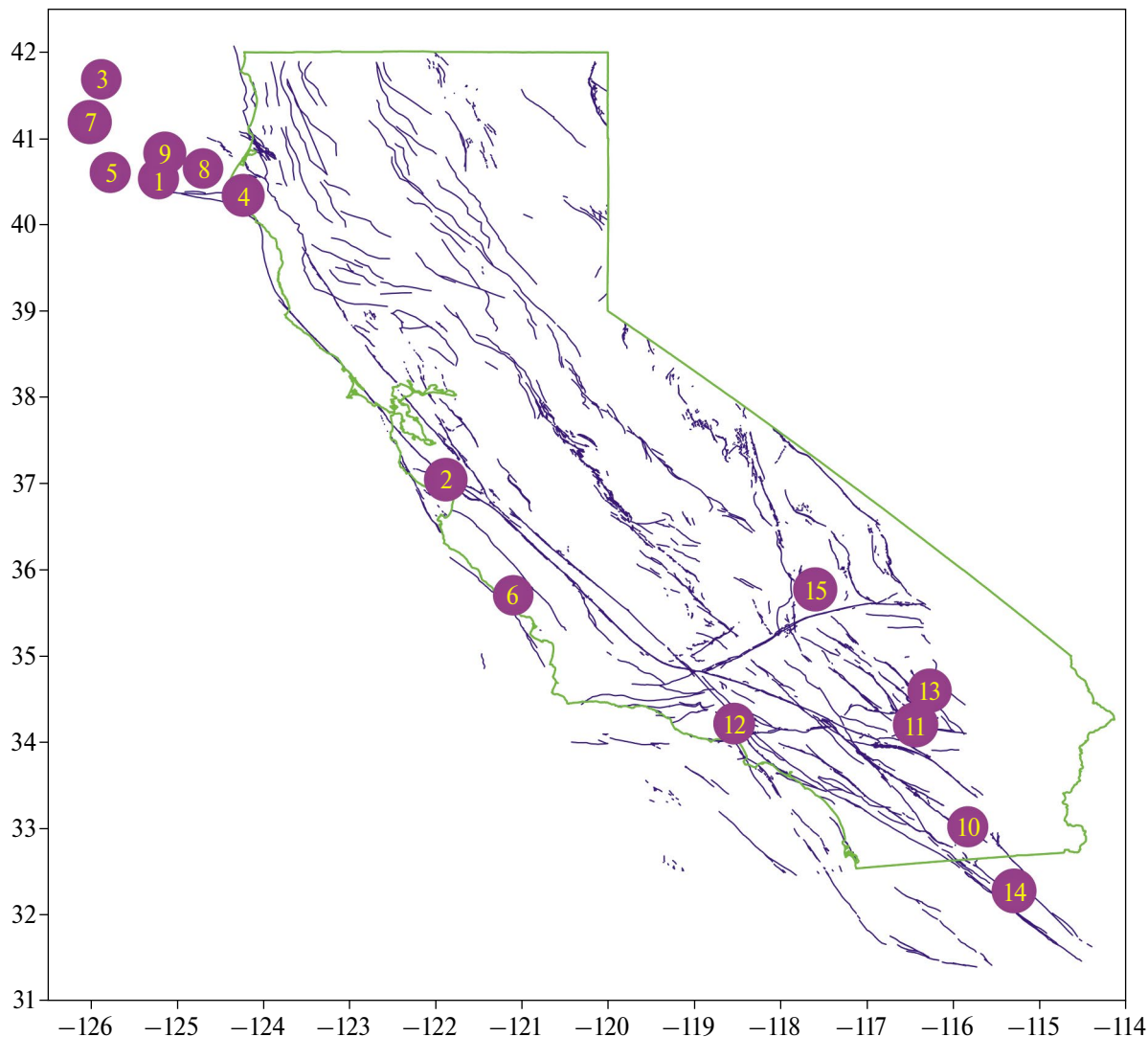


Рис. 3. Карта эпицентров исследуемых землетрясений. Номера землетрясений соответствуют табл. 1. Синим цветом показаны основные четвертичные разломы. Зеленым показана граница штата Калифорния.

Соболев, 1993; 2011; Соболев, Пономарев, 2003] или по заданной доле от максимального значения аномалии [Соболев, 2003].

Средняя (медианная) длительность аномалий *RTL* и *b-value* в Калифорнии оказалась меньше длительностей таких аномалий в зоне субдукции на Камчатке [Смирнов, Петрушов, 2023]. По сравнению с аномалиями перед японскими землетрясениями [Смирнов, Петрушов, 2023] длительности аномалий калифорнийских землетрясений по *RTL* сравнимы с японским, а по *b-value* меньше. В части сравнения длительностей аномалий *RTL* в Калифорнии, на Камчатке и в Японии в работе [Соболев, 2003] отмечаются такие же соотношения, но на меньшей, чем у нас статистике событий.

Из полученных нами результатов по калифорнийской сдвиговой разломной зоне (табл. 3) следует, что для 12 из 15 землетрясений аномалия *RTL* возникает раньше, чем аномалия *b*. Средняя разница длительностей таких аномалий составляет 0.8 года. Для зон субдукции Камчатки, Японии и рифтовой зоны Исландии нами была обнаружена обратная ситуация: аномалии *RTL* там обнаруживались позже аномалий наклона графика повторяемости [Смирнов, Петрушов, 2023].

При обсуждении возможных причин различия длительностей аномалий *RTL* в Калифорнии, на Камчатке, в Японии и на Сахалине Г.А. Соболев высказал осторожное предположение, что это может быть связано как с различием глубин землетрясений в Калифорнии и в зонах

Таблица 2. Параметры фильтрации каталога и расчетные окна для параметра b

Номер	Порог по магнитуде	Текущее окно, сут.	Расчетный радиус, км
1	2.5	100	130
2	2	200	130
3	3	350	130
4	2	300	200
5	3	500	200
6	2	300	130
7	2.5	300	130
8	2.5	300	130
9	2.5	300	200
10	3	500	150
11	2	500	170
12	2	300	200
13	2	365	200
14	3	350	200
15	3	350	200

субдукции, так и с различием процессов подготовки землетрясений в сдвиговых зонах, зоне субдукции на Камчатке и в переходных зонах от океана к континенту (внутриостровные землетрясения Японии, Сахалин) [Соболев, 2003]. Комментируя обнаруженную для зон субдукции и рифтовой зоны стадийность проявления аномалий мы высказали также осторожное предположение, что она может быть связана с особенностями локализации разрушения и искажения энергетического спектра сейсмичности в процессе подготовки землетрясений [Смирнов, Петрушов, 2023]. Обнаруженные различия особенностей проявления аномалий в областях, относящихся к различным генеральным тектоническим типам, перед землетрясениями с различными типами очагов требуют дальнейшего осмысления.

Для девяти калифорнийских землетрясений (60%) обнаруживается характерная особенность аномалий RTL : после восстановления значений RTL до нулевого уровня возникает задержка в несколько месяцев до момента землетрясения (события с номерами 1–4, 8–10, 12, 13

табл. 1; рис. 4а–4г, рис. 5г, 5д, рис. 6а, 6в, 6г). Среднесрочные аномалии связываются с формированием метастабильной области будущего очага сильного землетрясения [Соболев, 2011]. Природа задержки момента землетрясения после завершения формирования метастабильной области пока не ясна, время возникновения землетрясения в такой ситуации связывают, в частности, с триггерными механизмами [Соболев, 2011; 2015]. Для шести из отмеченных выше девяти калифорнийских землетрясений к моменту завершения аномалии RTL начальный спад величины b прекращается, и его значение остается на низком уровне вплоть до момента землетрясения (события с номерами 1, 2, 8–10, 12; рис. 4а, 4б, рис. 5г, 5д, рис. 6а, 6в). Для остальных трех землетрясений (номера 3, 4, 13; рис. 4в, 4г, рис. 6г) спад величины b не прекращается вплоть до момента землетрясения. Пониженные значения b после завершения бухтообразной аномалии RTL указывают на сохранение метастабильного состояния области среды, в которой потом происходит сильное землетрясение. Это говорит в пользу гипотезы

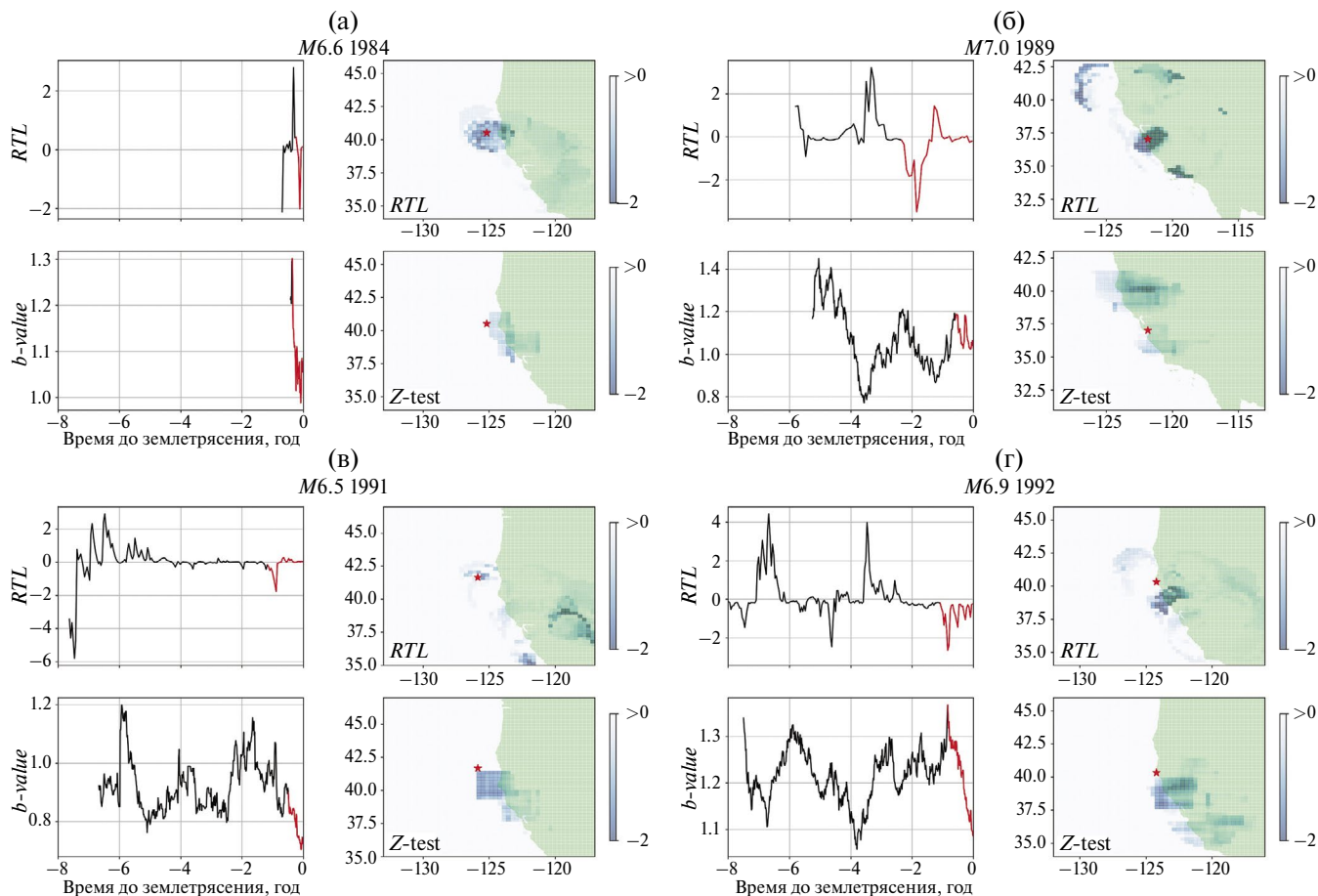


Рис. 4. Северная Калифорния: карты распределения исследуемых параметров сейсмического режима в момент наибольшей величины аномалии и временные графики значений параметров. Рисунки (а)–(г) соответствуют землетрясениям с номерами 1–4 в табл. 1.

о принципиальной роли триггерных эффектов, определяющих время землетрясения после формирования в среде метастабильной области [Соболев, 2015]. Как отмечалось в работе [Соболев, 2003], анализ аномалий геофизических полей (в том числе по литературным данным) может способствовать прояснению вопроса о причинах таких задержек.

Для пяти из исследованных землетрясений пространственные пятна аномалий b и RTL не перекрываются между собой. Несовпадение пространственных областей проявления аномалий отмечалось ранее в работе [Смирнов, Петрушов, 2023]. Вопрос о причинах несовпадения аномалий остается открытым, пока можно высказать лишь некоторые предположения. Во-первых, на пространственных картах на рис. 4–рис. 6 отмечена точка начала вспарывания очага (инструментальный эпицентр), в то время как сам очаг землетрясения имеет протяженную структуру,

размеры которой варьируются в интервале 30–110 км для выбранного диапазона магнитуд [Thingbaijam et al., 2017]. Расстояния между неперекрывающимися аномалиями соизмеримы с этими размерами (табл. 4). Возможно, аномалии приурочены к разным частям очага. Во-вторых, расстояния между пятнами соизмеримо с эффективной разрешающей способностью алгоритма расчета RTL , определяемой значением параметра r_0 , равного в настоящей работе 50 км. С учетом погрешности локации гипоцентров землетрясений и неравномерности их распределения в пространстве нельзя исключить влияние этого фактора на расположение “пятен” аномалий в пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа данных региональных каталогов Северной и Южной Калифорнии выявлены аномалии сейсмического режима перед

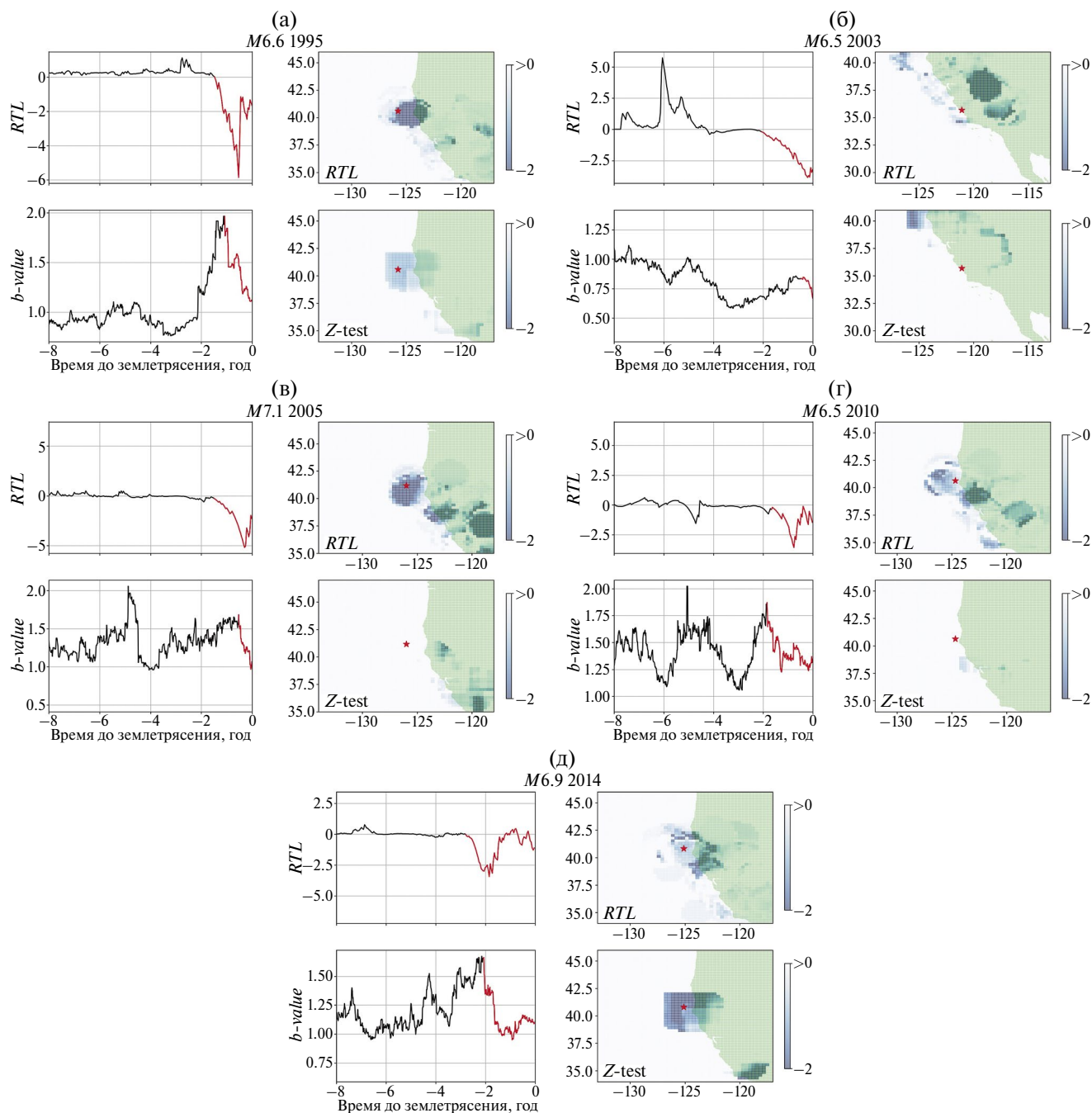


Рис. 5. Северная Калифорния: карты распределения исследуемых параметров сейсмического режима в момент наибольшей величины аномалии и временные графики значений параметров. Рисунки (а)–(д) соответствуют землетрясениям с номерами 5–9 в табл. 1.

15 наиболее сильными землетрясениями с магнитудами 6.5–7.3. Для аномалий наклона графика повторяемости b и параметра RTL оценены их длительности, пространственные размеры и расстояния от центра пятна аномалии до эпицентра соответствующего землетрясения.

Величины длительностей аномалий соответствуют типичным значениям для среднесрочных

предвестников, и лежат в диапазонах 0.25–2.8 лет для RTL и 0.37–2.4 лет для наклона графика повторяемости b . Средний размер аномалий в пространстве составил 230 км для параметра RTL , и 290 км для параметра b , что в 3–5 раз превосходит размеры очагов главных землетрясений (рассчитанных по формуле для сдвиговых очагов из работы [Thingbaijam et al., 2017]). Это

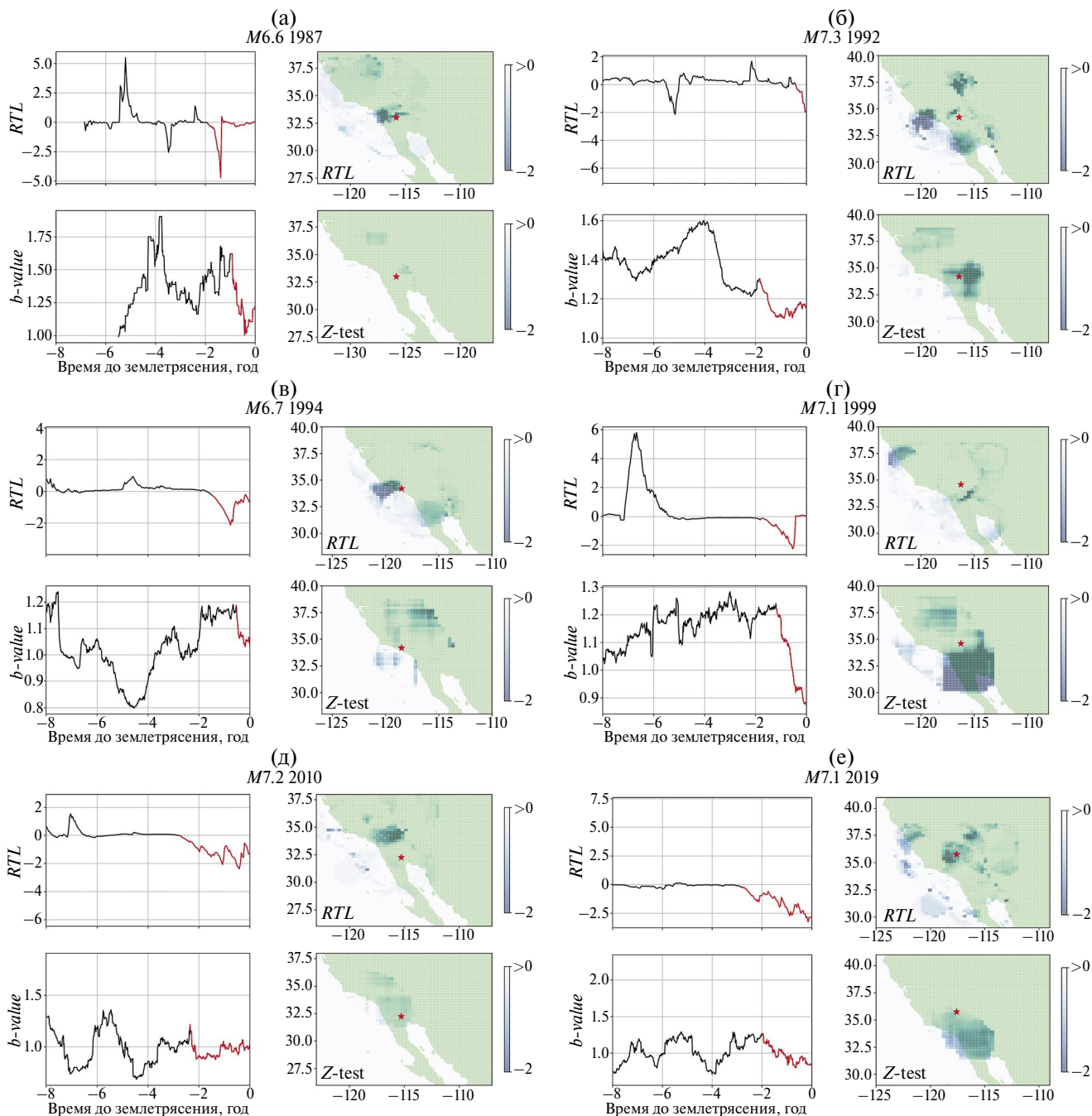


Рис. 6. Южная Калифорния: карты распределения исследуемых параметров сейсмического режима в момент наибольшей величины аномалии и временные графики значений параметров. Рисунки (а)–(е) соответствуют землетрясениям с номерами 10–15 в табл. 1.

соответствует предвестниковым аномалиям физического типа.

Для 12 из 15 землетрясений аномалии RTL начинаются раньше, чем аномалии наклона графика повторяемости. Такая очередность отличается от полученной ранее авторами для землетрясений в зонах субдукции и в рифтовой зоне, где для большинства землетрясений аномалии

RTL наступали позже аномалий параметра b [Смирнов, Петрушов, 2023].

При расчете параметра RTL для всех событий использовались единые параметры фильтрации каталога и настроечные коэффициенты, что говорит о высокой степени универсальности алгоритма и его устойчивости к разной плотности сейсмических данных.

Таблица 3. Длительности аномалий RTL и b и их разность

Номер	Магнитуда	Длительность RTL , годы	Длительность b , годы	$T_{RTL} - T_b$, годы
1	6.6	0.25	0.37	-0.12
2	7	2.4	0.6	1.8
3	6.5	1.2	0.5	0.7
4	6.9	1.1	0.85	0.25
5	6.6	1.5	1.1	0.4
6	6.5	2.1	0.5	1.6
7	7.1	1.5	0.55	0.95
8	6.5	1.7	1.86	-0.16
9	6.9	2.8	2.1	0.7
10	6.6	1.9	1	0.9
11	7.3	0.5	1.85	-1.35
12	6.7	1.5	0.54	0.96
13	7.1	1.8	1.2	0.6
14	7.2	2.8	2.36	0.44
15	7.1	2.8	2	0.8
Медиана	6.9	1.7	1.0	0.7

Важным отличием оценивания двух используемых параметров сейсмического режима является их разная чувствительность к временным расчетным окнам. В случае функции RTL коэффициент t_0 (формула (3)) отвечает за масштаб влияния землетрясений друг на друга во времени. Подвижка по одному разлому не может бесконечно долго влиять на напряженно-деформированное состояние окружающей его среды, поэтому введение характерного временного масштаба t_0 представляется физически обоснованным. Введение этого параметра позволяет не прибегать к дополнительным расчетным окнам по времени. Практика применения параметра RTL показала, что устойчивое обнаружение аномалий перед сильными землетрясениями возможно для широкого диапазона значений t_0 . Для расчета параметра b , который непосредственно связан с энергетическим спектром сейсмичности, используются только значения магнитуд набора землетрясений. Вследствие этого возникает потребность введения временного окна, для событий которого

рассчитывается значение b . Размер этого окна во многих случаях достаточно сильно влияет на поведение временного графика b в исследуемой области. В этом смысле параметр RTL оказывается более устойчивым индикатором аномальных процессов при подготовке сильных землетрясений.

В настоящей работе выделение аномалий основано, фактически, на авторской экспертной оценке, а не на формализованных критериях. Возможно, для решения задачи автоматизированного выделения пространственно-временных аномалий сейсмического режима имеет смысл развивать методы машинного обучения, интерес к которым применительно к этой задаче устойчиво растет [Proskura et al., 2019; Kali et al., 2021].

Выделение аномалии параметра b в ряде случаев вызывает определенные сложности. Временной ход параметра может испытывать падения, сменяющиеся кратковременными увеличениями, что затрудняет определение момента начала аномалии, соответствующей

Таблица 4. Пространственные размеры зарегистрированных аномалий, расстояния от центров аномалий до соответствующих им землетрясений

Номер	Магнитуда	Размер аномалии <i>RTL</i> , км	Размер аномалии <i>b</i> , км	Расстояние от центра аномалии <i>RTL</i> , км	Расстояние от центра аномалии <i>b</i> , км
1	6.6	300	300	30	169
2	7	230	240	30	150
3	6.5	90	210	30	120
4	6.9	230	310	150	160
5	6.6	310	270	110	90
6	6.5	280	200	300	400
7	7.1	300	150	50	280
8	6.5	220	150	110	210
9	6.9	190	400	110	10
10	6.6	140	350	40	250
11	7.3	230	230	250	120
12	6.7	270	120	140	140
13	7.1	160	550	103	290
14	7.2	240	400	250	200
15	7.1	250	500	40	270
Медиана	6.9	230	270	110	169

конкретному землетрясению. Параметр Z (формула (5)) делает сопоставимыми значения величин b в различных точках карты и позволяет достаточно контрастно выделять аномальные области в пространстве. Использование этого параметра во временной области, по нашему мнению, менее обосновано, поскольку он отражает отличие величины текущего значения b от фонового уровня, тогда как предвестниковая аномалия заключается не в величине параметра Гутенберга–Рихтера, а в его изменении во времени.

ВЫВОДЫ

1. Перед всеми землетрясениями Калифорнии с магнитудами $M \geq 6.5$, представленными в прецизионных каталогах Северной и Южной Калифорнии с 1984 г. по настоящее время, уверенно выделяются аномалии наклона графика повторяемости b и параметра RTL .

2. Длительности выявленных аномалий и их размеры в пространстве соответствуют величинам, характерным для среднесрочных предвестников землетрясений.

3. Величины длительностей аномалий калифорнийских землетрясений меньше длительностей аномалий камчатских землетрясений, оцененных авторами ранее. Этот вывод подтверждает заключение, сделанное ранее Г.А. Соболевым на существенно меньшей статистике событий.

4. В сдвиговой калифорнийской зоне стадийность проявления аномалий b и параметра RTL оказалась обратной к стадийности, обнаруженной авторами ранее в зонах субдукции и рифтовой зоне.

5. Больше половины из исследованных в Калифорнии землетрясений происходит с задержкой в несколько месяцев после завершения бухтообразных аномалий параметра RTL , отражающих завершение формирования метастабильной области среды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23–27–00067, <https://rscf.ru/project/23-27-00067/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука. 1973. 900 с
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С. 19–50.
- Писаренко В.Ф. О законе повторяемости землетрясений. Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука. 1989. С. 47–60.
- Писаренко В.Ф., Скоркина А.А., Руковишникова Т.А. Как выбирать интервал магнитуд для оценки наклона графика повторяемости // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 3–11.
- Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П. Особенности развития сейсмической роевой активности в Коринфском рифте в 2000–2005 гг. // Физика Земли. 2011. № 7. С. 54–66.
- 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., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А. Параметрическое представление динамик сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84
- Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 191 с.
- Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 93–105.
- Смирнов В.Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009 Т. 10. № 2. С. 7–22.
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А. Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед землетрясениями Камчатки, Японии и Исландии // Физика Земли. 2023. № 5. С. 62–78.
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А., Михайлов В.О. Об RTL-аномалии сейсмического режима перед землетрясением в Турции 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 122–132.
- Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН. 2011. 56 с.
- Соболев Г.А. Методология, результаты и проблемы прогноза землетрясений // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 3. С. 203–208.
- Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. № 1. С. 166–179.
- Соболев Г.А. Применение алгоритма RTL для анализа стадий подготовки сильных землетрясений Калифорнии // Физика Земли. 2003. № 2. С. 3–13.
- Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.
- Соболев Г.А., Пономарёв А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 17–26.
- 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.
- 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.
- Brace W.F., Byerlee J.D. California Earthquakes: Why Only Shallow Focus? // Science. 1970. V. 168(3939). P. 1573–1575. DOI: 10.1126/science.168.3939.1573
- Hauksson E., Yang W., Shearer P.M. Waveform Relocated Earthquake Catalog for Southern California (1981 to 2011) // Bull. Seismol. Soc. Am. 2012. V. 102. № 5. P. 2239–2244. DOI: 10.1785/0120120010
- 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.
- Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. New York: W.H. Freeman and Co. 1983. 468 p.
- Molnar P. The brittle-plastic transition, earthquakes, temperatures and strain rates // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. e2019JB019335. <https://doi.org/10.1029/2019JB019335>
- 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
- Scholz C. H. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge Univ. Press. 2019. 493 p.
- Thingbaijam K.K.S., Mai M.P., Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws // BSSA. 2017. V. 107. № 5. P. 2225–2246. DOI: 10.1785/0120170017

Features of Seismicity Anomalies before Strong Earthquakes in California

A. A. Petrushov^{a,b,*}, V. B. Smirnov^{a,b}, V. O. Mikhailov^{a,b}, and S. A. Fomina^a

^aFaculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia

*e-mail: petrushov.aa18@physics.msu.ru

Received February 27, 2024

revised March 10, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract – Before the 15 strongest earthquakes in California with magnitudes $M \geq 6.5$ from 1984 to 2023, an analysis of seismicity anomalies was conducted using two parameters: the b -value and the RTL function. Spatiotemporal anomalous areas were identified based on known precursors for these parameters. The values of tuning coefficients for the calculation algorithms and catalog filtering parameters selected for the analysis of each earthquake are presented. Characteristics of the anomalies were determined, including their duration, size, and distance from the center of the anomaly to the earthquake epicenter. A comparison of anomaly durations revealed that, for most earthquakes, RTL parameter anomalies occur earlier than b -value anomalies. This sequence of anomaly occurrence differs from the sequence found by the authors previously when analyzing strong earthquakes in subduction zones and rift zones. A significant portion of the earthquakes studied in California occur with a delay of several months after the completion of the bay-like anomalies of the RTL parameter, which reflect the end of the formation of a metastable region in the medium. Meanwhile, abnormally low values of b -value persist until the moment of the earthquake.

Keywords: seismicity, seismicity anomalies, stages, shear zone