

Сейсмические аномалии по данным каталога землетрясений Китая

Гао Фэнкай*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 19.05.2022; подписана в печать 30.10.2022)

В данной работе рассматриваются аномалии, предшествующие землетрясениям, для пяти сильных землетрясений Китая (Синьцзян-Юйтяньского землетрясения MS7.3 Вэньчуаньского землетрясения MS8.0, Лушаньского землетрясения MS7.15, Цзючжайгоуского землетрясения MS7.2, и Милинского землетрясения MS7.1). На основе модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) применялись три различных метода прогноза: график наклона повторяемости (b -value), алгоритм регионально-временной-длины (RTL) и концентрация сейсмогенных разрывов (K_{CP}). Анализ пространственно-временного распределения аномалий сейсмической активности перед сильными землетрясениями показывает, что аномалии RTL и K_{CP} были обнаружены во все периоды перед землетрясениями, в то время как аномалии b -value не были обнаружены в одном из них. Средние значения времен проявления аномалий составили: RTL — 2.13 года; b -value — 3.45 лет; K_{CP} — 16.75 лет. Среднее расстояние между областью основной аномалии RTL и эпицентром: 0.895° . Результаты показывают, что метод сейсмического прогнозирования, основанный на модели ЛНТ, применим к геологическим условиям Китая и что время аномалий, предшествующих землетрясению, указывает на вероятность возникновения землетрясения.

PACS: УДК: 550.343.2

Ключевые слова: сейсмические аномалии, каталог землетрясений Китая, ЛНТ, RTL, b -value, K_{CP} .

ВВЕДЕНИЕ

Китай расположен между сейсмическим поясом Тихоокеанского кольца и Евразийским сейсмическим поясом. Сжатая Тихоокеанской плитой, Индийской плитой и Филиппинской морской плитой, зона сейсмических разломов очень активна. А юго-западная часть Китая — это регион, где сильные землетрясения происходят чаще всего и приводят к наибольшему количеству жертв и экономическому ущербу. В этом регионе существует острая необходимость в исследованиях по прогнозу землетрясений, поэтому наше главное событие находится в этом регионе.

Работа по прогнозу землетрясений тесно связана с моделью подготовки к землетрясениям, и данная работа выполнена в рамках модели ЛНТ, которая впервые была представлена в докладе сотрудников Института физики Земли РАН на Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в Москве в 1971 г. После многих лет разработки модель стала зрелой, но по некоторым особым причинам она не была распространена за пределами СССР, включая Китай, поэтому ее применимость к китайским геологическим условиям нуждается в проверке.

Надежная идентификация аномалий важна для определения риска возникновения землетрясения и снижения потерь от стихийных бедствий. Среди множества предвестников аномалии сейсмической активности играют важную роль в изучении закономерностей возникновения землетрясений и определе-

нии риска их возникновения, и уже получены некоторые эмпирические результаты. Эволюция изображений сейсмической активности перед сильными землетрясениями имеет схожие характеристики: фон-повышенная сейсмическая активность (явление низкого b -value) — сейсмическая полоса (рой форшоков) — затишье землетрясения — главный шок, что отражает поэтапный характер процесса подготовки сильного землетрясения.

Для некоторых конкретных последовательностей землетрясений b -value меняется до и после главного толчка, причем b -value меньше для последовательностей до толчков по сравнению с после толчков. Это свойство согласуется с уменьшением состояния высокого напряжения после главного землетрясения, и поэтому изменение b -value со временем считается полезным для прогнозирования землетрясений [1, 2].

Аномалии RTL также являются важными предвестниками. При известных координатах и времени начала эпицентра алгоритм RTL может эффективно исследовать аномалии спокойной или повышенной сейсмической активности на целевом участке. Результаты работы алгоритма на основе RTL показывают, что спокойная сейсмичность была обнаружена за 1.5–3.5 года до сильных землетрясений в Камчатском крае $M_S > 7.0$, Ханшин $M_S 7.2$, полуострове Немуро MW6.8 и Турции MW7.4, с продолжительностью около 1–2.5 лет.

K_{CP} — это лабораторный и полевой метод прогнозирования, который доказал свою надежность во многих сейсмически активных регионах (Кавказ, Туркменистан, юго-западный Китай, Греция и т.д.). Исследования на юго-западе Китая показали, что среднее время появления аномалий K_{CP} составляет 3.3 ± 2.6 года до землетрясения.

* gao.f19@physics.msu.ru

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Модель лавинно–неустойчивого трещинообразования (ЛНТ)

Модель лавинно–неустойчивого трещинообразования разработана Мячкиным В.И., Костровым Б.В., Соболевым Г.А., Шаминой О.Г. в 1975 г. [3].

Основу модели ЛНТ составляют два явления: взаимодействие полей напряжений трещин и локализация процесса трещинообразования. Принято считать, что порода находится под постоянным давлением, количество и размер трещин (дефектов) в породе со временем будут постепенно увеличиваться до достижения «докритических» напряжений в породе. После достижения некоторой критической плотности трещин материал переходит в стадию быстрого макроразрушения.

В рамках ЛНТ модели предполагается, что процесс перехода от состояния критической плотности трещин к макроразрушению происходит путем слияния трещин в результате взаимодействия их полей напряжений. Теоретически показано, что устойчивость системы благоприятно расположенных трещин резко падает при уменьшении расстояния между трещинами.

В работе [4] представлено, что из теории Гриффитса и ее развития следует, что величина критической нагрузки F , при которой изолированная трещина начинает динамически распространяться, обратно пропорциональна корню квадратному из длины трещины l :

$$F = \left| \frac{4G \cdot \gamma}{C \cdot l} \right|^{1/2}, \quad (1)$$

где G — модуль сдвига, γ — эффективная удельная поверхностная энергия, C — коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния и формы трещины. Это соотношение означает, что при прочих равных условиях в процессе объединения трещин преимущественно должны взаимодействовать и сливаться более длинные из них.

У модели ЛНТ имеется три стадии процесса подготовки землетрясений [5]:

Стадия I — квазиоднородное растрескивание. На этой стадии под действием тектонических напряжений происходит медленный рост как числа, так и размеров существующих трещин и образование новых.

Стадия II — лавинное взаимодействие трещин. В этой стадии плотность трещин достигает определенного уровня, и взаимодействие между ними приведет к появлению больших трещин, а также к быстрым и резким изменениям локальных полей напряжений. При этом происходят изменения интегральных характеристик среды, которые проявляются в различных геофизических полях и являются предвестниками готовящегося землетрясения.

Стадия III — стадия неустойчивости. Деформация локализуется в узкой зоне, охватывающей область будущего магистрального разрыва, в которой развивается

несколько относительно крупных трещин. Ускоряющийся рост деформаций в этой зоне приводит к тому, что в прилегающем к ней объеме среды происходит падение напряжений и упругое восстановление физико-механических свойств. Узкая зона неустойчивой деформации характеризуется повышенной концентрацией разрывов, которые в совокупности представляют собой поверхность магистрального разрыва. Этот разрыв — очаг землетрясения.

ЛНТ-модель имеет следующие преимущества [5]:

- Модель исходит из фундаментальных положений физики длительной прочности.
- Она не зависит от масштаба явления и может применяться к описанию подготовки разрушения не только в очагах землетрясений разных энергий, но и динамическим явлениям в шахтах (горные удары) и разрушению крупных инженерных сооружений при длительном действии нагрузок.
- С помощью модели объясняется образование широко распространенных эшелонированных систем разрывов различного масштаба, отмечаемых в тектонически активных районах, и соответствующих вариаций сейсмического режима.

Также отмечены и некоторые недостатки модели [5]:

- Разработанный математический аппарат дает возможность оценить только развитие I стадии модели — объемного трещинообразования; кинетика II стадии — локализации — не находит пока количественного описания.
- Отмечаемые в ряде случаев большие (более 10%) изменения удельного электрического сопротивления и отношения скоростей сейсмических волн (если они реально связаны с землетрясением) вряд ли могут быть объяснены эволюцией разрывов сдвигового типа без учета изменения влагонасыщенности пород.

1.2. Прогностические методы, основанные на модели ЛНТ

В настоящей работе будут рассмотрены три метода, основанные на модели ЛНТ. Все они в качестве входных данных принимают каталоги землетрясений и применяются для ретроспективного прогноза сильных землетрясений в Китае.

1.2.1. Алгоритм RTL

Алгоритм Регион–Время–Длина (сокращенно RTL–алгоритм) был предложен Соболевым и Тюпкиным

(1997, 1999) [4, 6]. Этот метод широко используется при изучении умеренных и сильных землетрясений, особенно затишья и активизации предвестников сейсмической активности перед сильными землетрясениями. Предыдущие исследования показали, что они обнаруживались пред землетрясениями в различной степени.

Основное предположение этого метода состоит в том, что каждое предыдущее событие влияет на основное исследуемое событие, и вес этого влияния изменяется в соответствии со следующей формулой. Значение RTL (состояние среды в (x, y, z) в момент времени t) является произведением трех безразмерных факторов: $R(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ и $L(x, y, z, t)$, они определяются как [5]:

$$R(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_{tr}(x, y, z), \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_{tr}(x, y, z), \quad (3)$$

$$L(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{r_i}\right) \right] - L_{tr}(x, y, z), \quad (4)$$

где r_i — расстояние между данным местоположением и гипоцентром i -го землетрясения, r_0 — характерное расстояние, $R_{tr}(x, y, z)$ — тренд $R(x, y, z)$ за расчетный период, t_i — время возникновения i -го землетрясения, t_0 — характерный временной интервал, $T_{tr}(x, y, z)$ — тренд $T(x, y, z)$ за расчетный период, l_i — размер разрыва i -го землетрясения (= длина разлома) в километрах, полученная из связи с i -й магнитудой землетрясения M_i : $\log l_i = 0.635M_S - 2.8084$ [8], а $L_{tr}(x, y, z)$ — это тренд $L(x, y, z)$ за расчетный период. Целое число n — это количество землетрясений, удовлетворяющих следующим критериям:

$$M_i \geq M_{min}; r_i \leq R_{max} = k_r r_0; t - t_i \leq T_{max} = k_t t_0,$$

где M_{min} — величина отсечки, обеспечивающая полноту каталога землетрясений после декластеризации, а R_{max} и T_{max} — расстояние отсечки и временной интервал соответственно. В прошлом почти все исследования принимали 2 для k_r и k_t . Фактически используемые три фактора (R , T и L) после нормализации их стандартными отклонениями представляют собой соответственно σR , σT и σL . Следовательно, рассчитанное значение RTL выражается в единицах стандартного отклонения ($\sigma = \sigma R \sigma T \sigma L$).

Для обработки данных используется программное обеспечение «RTL Analyser v.2.0», программа предоставлена институтом. В программном обеспечении можно импортировать данные каталога в формате ASCII, выбирать диапазон данных, рисовать карты сейсмического каталога, устанавливать параметры RTL

и просматривать карты RTL, которые меняются во времени, а также можно экспортировать результаты расчета параметров RTL для дальнейшего анализа [5].

1.2.2. Наклон графика повторяемости b -value

Соотношение магнитуды и частоты $\lg N(M) = a - bM$, предложенное Гутенбергом и Рихтером в 1954 г., является одним из основных законов при изучении параметров сейсмической активности [7]. Это эмпирическая формула, где M — магнитуды землетрясений, N представляет собой количество землетрясений, превышающих или равных M в течение определенного периода времени, а точка пересечения с осью y представляет уровень сейсмической активности в районе, в зависимости от объема исследования. Параметр b -value представляет собой пропорциональную зависимость между сильными землетрясениями и небольшими землетрясениями. Низкое b -value представляет большую долю сильных землетрясений во всех землетрясениях, а высокое b -value представляет большую долю небольших землетрясений во всех землетрясениях.

Различные исследователи обсуждали физический смысл b -value с помощью экспериментов с горными породами. Они считают, что b -value является индикатором напряженного состояния и характеристик среды [8, 9] и обратно пропорционально напряжению. Область с низким b -value имеет более высокое накопление напряжений. Кроме того, b -value также связано с хрупкостью, упругостью, пластичностью, степенью разрушения и другими свойствами горных пород среды в этой области.

Большое количество экспериментов и реальных примеров землетрясений показывают, что b -value очевидно изменяется до разрушения горной породы или крупного землетрясения. Сейсмологи провели b -value глубокие исследования и применили его к исследованиям по прогнозированию землетрясений и оценке риска землетрясений. Изменение b -value с течением времени также считается важным.

Текущие методы вычисления b -value в основном включают линейный метод наименьших квадратов, нелинейный метод наименьших квадратов, оценку максимального правдоподобия. Самые распространенные методы вычисления b -value — это линейный метод наименьших квадратов и метод максимального правдоподобия. Формула для вычисления значения b методом максимального правдоподобия [10]:

$$b = \lg \left[1 + \frac{N_{\Sigma}}{\sum_{n=0}^{\infty} n \cdot N(M_{min} + n \cdot \Delta M)} \right] / \Delta M, \quad (5)$$

При этом:

$$\sigma_b \approx b / \sqrt{N_{\Sigma}}, \quad (6)$$

где N_{Σ} — суммарное число землетрясений в диапазоне магнитуд от M_{min} до M_{max} (объем выборки);

$N(M_{min}+n \cdot \Delta M)$ — число землетрясений магнитуд $M_{min}+n \cdot \Delta M$, $n=0, 1, 2, \dots \Delta M$ — единица диапазона магнитуд.

Также для более наглядного отображения тренда *b-value* часто используется безразмерная величина Z , а выражение для Z выглядит следующим образом:

$$Z = \frac{(b_2 - b_1)}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}}. \quad (7)$$

Значение Z может измерять статистически значимое отклонение текущего *b-value* от его долгосрочного (фоновое) значения, где b_1 и b_2 — значения наклонов графика повторяемости землетрясений за сравниваемые интервалы времени; σ_1 и σ_2 — значения среднеквадратичного отклонения оценок b_1 и b_2 .

Обычно считается, что метод наименьших квадратов прост и легок в реализации, и это широко используемый метод для подбора *b-value* [11], но некоторые ученые считают, что на метод наименьших квадратов могут влиять различные веса землетрясений большой и малой магнитуды, в то время как для метода максимального правдоподобия вес каждого землетрясения одинаковый, поэтому ошибка мала [12].

В принципе, выводы, сделанные двумя методами, должны быть схожими. Однако большая практика доказала, что ошибка вычислений, объем вычислений и размер выборки, требуемые для вычисления метода максимального правдоподобия, меньше, чем вывод метода наименьших квадратов [13]. Таким образом, в данном анализе используется метод максимального правдоподобия (формула (1.5)).

1.2.3. Плотность сейсмогенных разрывов КСР

Представления о концентрационном критерии разрушения твердых тел, разработанные академиком С. Н. Журковым в 50–60 гг. прошлого века оказали существенное влияние на становление и развитие физики очага землетрясения и процессов его подготовки [14].

Это безразмерная величина, отображающая отношение среднего расстояния между соседними разрывами к средней длине разрывов, накопленных при подготовке землетрясений. Концентрационный критерий устойчив к пространственному и энергетическому масштабу сейсмических явлений. Он следует из кинетической концепции прочности и обладает, таким образом, глубоким физическим смыслом.

С.Н. Журков считал, что до появления макротрещин будет образование и накопление микротрещин, а слияние микротрещин приведет к окончательному растрескиванию. А концентрационный показатель укрупнения трещин можно выразить следующей формулой:

$$l/L = c^{-1/3} / L = K^*, \quad (8)$$

где K^* — концентрационный критерий разрушения (укрупнения трещин), L — среднее расстояние между

центрами микротрещин, l — средний размер микротрещин по ансамблю, c — концентрация трещин.

Физический смысл K^* состоит в том, что он характеризует близость макротрещин друг к другу и, следовательно, их способность к взаимодействию и слиянию. Величина K^* оказалась практически постоянной непосредственно перед моментом макроразрушения как для широкого диапазона материалов, в том числе и горных пород, так и для широкого диапазона размеров трещин: от микротрещин до разрывов в земной коре, образующихся при землетрясениях.

Параметр концентрации (плотности) сейсмогенных разрывов $K_{СР}$ характеризует состояние сейсмического процесса в рассматриваемом объеме земной коры V_0 на момент времени t . Он можно выразить следующей формулой:

$$K_{СР} = \frac{R_{СР}}{l_{СР}} = \frac{\mu^{-1/3}}{l_{СР}}, \quad (9)$$

где $\mu = N/V_0$ — объемная плотность (концентрация) разрывов, идентифицируемая по произошедшим землетрясениям; $l_{СР} = \frac{1}{N} \sum_j l_j$ — средняя длина разрыва по ансамблю трещин; N — общее число землетрясений в диапазоне энергетических классов $[K_{min}, K_{max}]$, произошедших в элементарном сейсмоактивном объеме V_0 за время ΔT , l_j — длина единичного сейсмогенного разрыва, которая оценивается по формуле вида

$$\lg l_j = \alpha M_j + c.$$

Здесь M_j — магнитуда землетрясения.

2. ПЕРВИЧНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО КАТАЛОГА КИТАЯ

2.1. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ)

Известно, что данные каталога землетрясений из Китайской сейсмологической сети использовали для завершения работы по устранению афтершоков, подробный алгоритм можно увидеть в работе [15, 16]

Мы рассчитали представительность каталога с помощью кривой отношения Gutenberg–Richte [7], и получили результат — $M_C = 2.5$.

Параметры землетрясений, выбранных в данной работе, показаны в табл. 1, а их пространственное распределение показано на рис. 1.

Для анализа сейсмической активности в данной работе использовался каталог за 20 лет до изучаемого землетрясения.

При проведении *RTL*-анализа использовались параметры из [17, 18], характерное время $t_0 = 365$ дней, длина скользящего шага — 10 дней, глубина отсечки $d_0 = 50$ км, минимальная магнитуда — $M_{min} = 2.5$, а точка сканирования скользит при $0.2^\circ N \times 0.2^\circ E$.

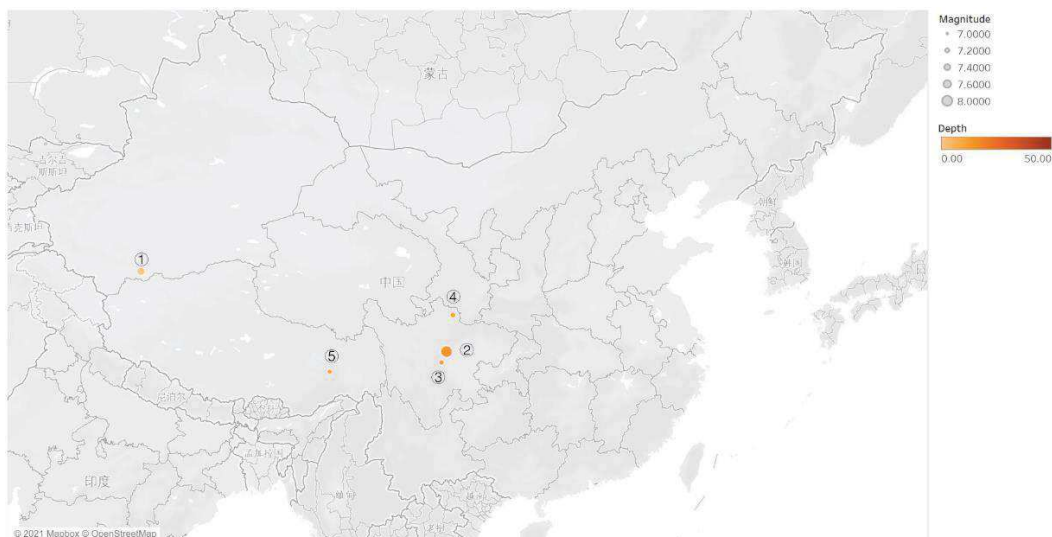


Рис. 1. Карта пространственного распределения выбранных землетрясений

Таблица 1. Параметры выбранных землетрясений

№	Дата (dd.mm.yyyy)	Широта (°N)	Долгота(°E)	Магнитуда (M_S)
1	20.03.2008	35.80	81.43	7.40
2	12.05.2008	31.00	103.40	8.00
3	20.04.2013	30.30	103.00	7.15
4	08.08.2017	33.20	103.82	7.20
5	17.11.2017	29.75	95.00	7.10

Поскольку на характерный радиус r_0 влияет доступность данных, в областях с лучшей доступностью данных характерный радиус r_0 составляет около 50 км, а в областях с плохой доступностью данных $r_0 \approx 75$ [17]. Исходя из этого, автор использовал характерный радиус $\Delta r_0 = 10$ км в качестве величины изменения и провел несколько расчетов. Результаты показывают, что параметры приемлемы в определенном диапазоне, и изменение в этом диапазоне повлияет только на разницу в значениях RTL , но не изменит ее тенденцию с течением времени, поэтому не влияет на оценку отклонений. Подробные настройки параметров показаны в табл. 2.

При выполнении анализа b -value автор устанавливает размер шага и окно сканирования в соответствии с количеством данных. Подробные настройки параметров показаны в табл. 2.

При выполнении программ для K_{CP} пересчитывается K_{CP} , когда появляется землетрясение с $M_S = 7$. Согласно работе [19, 20], величина критического уровня K_{CP}^{mp} была установлена. Поскольку в Китае мало исследований K_{CP} , установка величины критического уровня K_{CP}^{mp} не может быть точным ориентиром для первого землетрясения. Подробные настройки параметров показаны в табл. 2.

3. АНОМАЛИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА КИТАЯ

В данной работе анализ RTL , b -value и K_{CP} был проведен для всех изученных случаев землетрясений. Временной диапазон данных — от 20 лет до землетрясения до двух лет после землетрясения; пространственный диапазон данных — квадрат с центром в эпицентре и длиной стороны 6° ($1^\circ \approx 111.11$ км).

3.1. Землетрясение 20.03.2008

Землетрясение Синьцзян–Юйтянь с $M_S 7.3$ (21 марта 2008 г.) произошло на пересечении разлома Кансиwa в сейсмическом поясе Западный Куньлунь, сейсмического пояса Алтын и разлома Кекексили в сейсмическом поясе восточного Куньлуна. Геологическое строение сложное, основной тип очага сдвиг.

В данной работе используется каталог землетрясений с 1 января 1988 г. по 31 декабря 2010 г., а также используется метод, описанный в разд. 1 данной работы, для прогнозирования и анализа землетрясений.

Эволюция пространственного распределения RTL во времени показана на рис. 2, видно, что примерно за

Таблица 2. Конкретные настройки параметров для анализа

№	Параметры для анализа <i>RTL</i>			Шаг и окно для <i>b-value</i>		K_{CP}^{mp}
	t_0/t_{max} (день)	r_0/r_{max} (км)	p	Шаг(шт.)	Окно(шт.)	
1	365/730	75/200	1	50	200	–
2	365/730	50/100	1	70	500	53.1
3	365/730	40/70	1	50	200	53.1
4	365/730	40/70	1	40	220	53.1
5	365/730	40/70	1	10	100	53.1

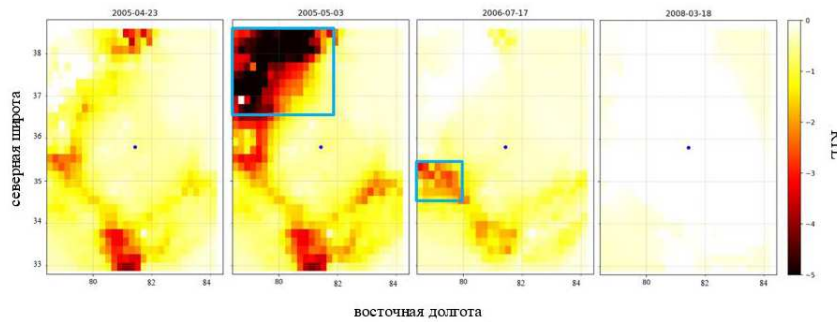


Рис. 2. *RTL* пространственное распределение, синий прямоугольник — основная аномальная область. Диапазон основной аномальной зоны: 36.5–39°N; 78–81.8°E. Диапазон основной аномальной зоны: 34.5–35.4°N; 78–80°E

три года до землетрясения спокойные области были зарегистрированы в 280 км к северо-западу от эпицентра (область 1) и в 250 км к западу от эпицентра (область 2). Изображение изменения *RTL* во времени для областей 1 и 2 показано на рис. 3.

Область 1 имеет большую область аномалии и сильную степень, но продолжительность короткую, а область 2 имеет большую продолжительность, но степень слабую и область небольшую.

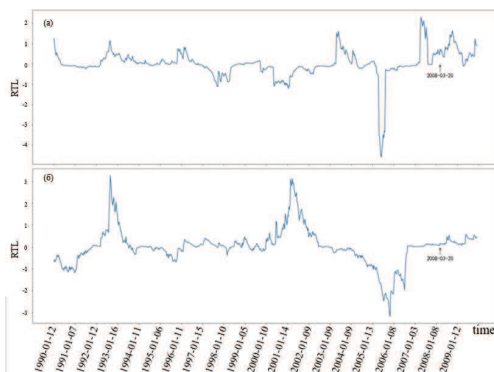


Рис. 3. График *RTL* в основной аномальной области с течением времени. *a* — График *RTL* в области 1; *b* — График *RTL* в области 2

Изменение *RTL* во времени для зон 1 и 2 (рис. 3) показывает, что:

1. Зона 1 имела очень серьезную аномалию за 3 года до землетрясения, *RTL* достигло 4, и увеличе-

ние сейсмической активности произошло за 1 год до землетрясения, что можно рассматривать как форшок.

2. Зона 2 вошла в период затишья за 4 года до землетрясения, а период затишья длился два с половиной года, что является очевидным предвестником землетрясения.

Из анализа *b-value* (рис. 4) видно, что *b-value* имеет тенденцию к медленному снижению в течение четырех лет до землетрясения, а сейсмическая активность ослабла. Однако из-за нехватки данных погрешности *b-value* (рис. 4, *a*) очень велики. Несмотря на тенденцию к снижению, очевидно, что оно не может использоваться в качестве основы для прогноза землетрясений из-за небольшого спада и большой ошибки. Из диаграммы пространственного распределения *b-value* и *Z* 17 мая 2007 г. (рис. 4, *b*) видно, что *b-value* до землетрясения было низким.

Из графика изменений K_{CP} со временем (рис. 5) видно, что K_{CP} быстро снижалась с 1988 по 1993 гг., а затем медленно снижалась. Хотя в этой области нет прецедентов исследования величина критического уровня K_{CP} , мы можем считать $K_{CP} = 7.1$ для этого землетрясения, что означает, что долгосрочный прогноз может быть сделан за 15 лет до землетрясения.

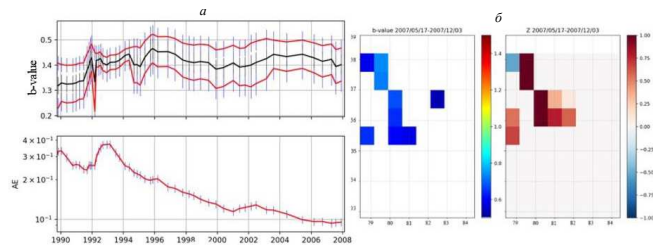


Рис. 4. График анализа b -value: a — график b -value и уровня сейсмической активности во времени; b — график пространственного распределения b -value и Z

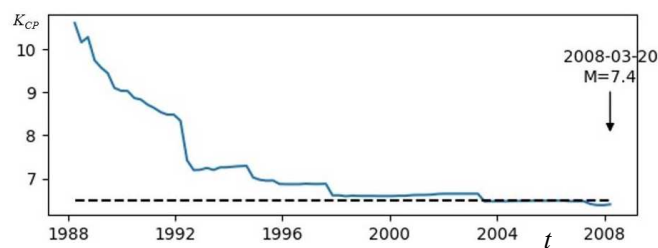


Рис. 5. График K_{CP} во времени, диапазон сканирования $35.73\text{--}36.18^\circ\text{N}$, $80.84\text{--}81.38^\circ\text{E}$

3.2. Землетрясение 12.05.2008

Землетрясение Вэньчуань $M_S 8.0$ (12 мая 2008 г.) произошло в тектоническом поясе Лунменшань Наппе. Это одно из самых известных землетрясений в Китае.

В данной работе используется каталог землетрясений с 1 января 1988 г. по 31 декабря 2010 г., а также используется метод, описанный в главе 1 данной работы, для прогнозирования и анализа землетрясений.

Эволюция пространственного распределения RTL во времени показана на рис. 6. Видно, что за год до землетрясения было затишье, но диапазон был небольшим. Со временем размах и масштабы аномалии увеличились, достигнув пика 19 декабря 2007 г. Затем сейсмическая активность усилилась и произошло землетрясение.

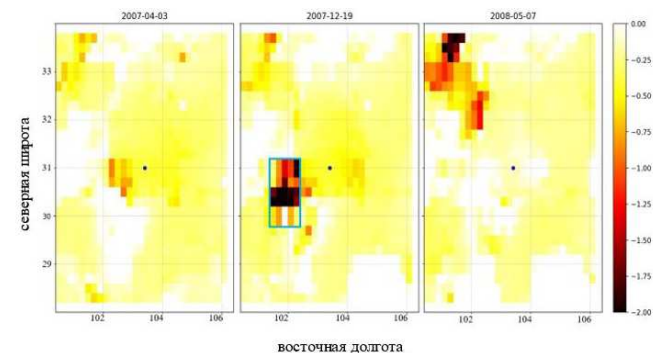


Рис. 6. RTL пространственное распределение, синий прямоугольник — основная аномальная область. Диапазон основной зоны аномалии: $29.7\text{--}31.2^\circ\text{N}$; $101.1\text{--}102.4^\circ\text{E}$

Автор выбрал область с самой сильной аномалией в качестве основной области аномалии (в синем прямоугольнике на рис. 6) и сделал график изменения RTL во времени, как показано на (рис. 7). Видно, что RTL сначала растет, а затем падает, и возвращается в область нулевого значения, а затем происходит землетрясение.

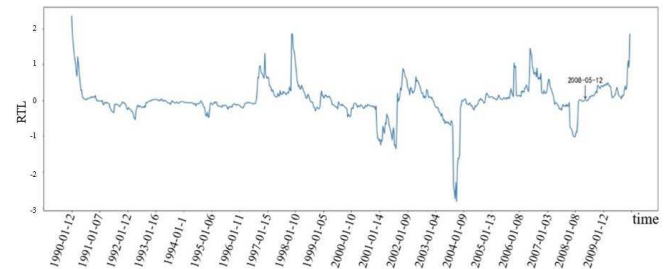


Рис. 7. График RTL в основной аномальной области с течением времени

Из графика b -value (рис. 8, a), можно видеть, что b -value начало снижаться в 2006 г., землетрясение произошло после двух лет непрерывного снижения. Это явный предвестник землетрясения. Из карт пространственного распределения b -value и Z (рис. 8, b) также видно, что b -value было ниже фонового уровня 21 апреля 2007 г.

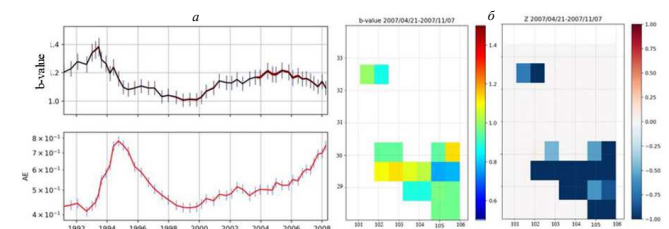


Рис. 8. График анализа b -value. a — график b -value и уровня сейсмической активности во времени; b — график пространственного распределения b -value и Z

Из изображения K_{CP} видно (рис. 9), что в 1990 г. K_{CP} достигла величина критического уровня K_{cp} , который может дать долгосрочный прогноз землетрясения за 18 лет до землетрясения.

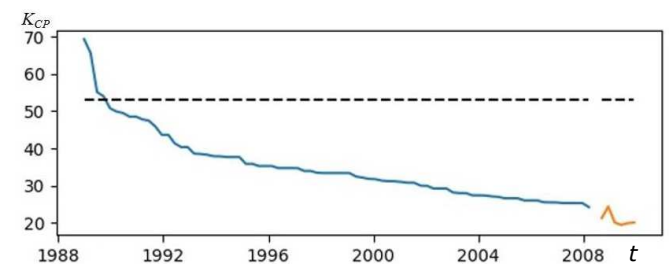


Рис. 9. График K_{CP} во времени, диапазон сканирования $30.84\text{--}31.65^\circ\text{N}$; $102.7\text{--}103.61^\circ\text{E}$

3.3. Землетрясение 20.04.2013

Землетрясение Лушань $M_S7.15$ (20 апреля 2013 г.) произошло в зоне структурных деформаций к востоку от разлома Цяньшань в южной части горы Лунмэнь. Землетрясение Лушань произошло за 5 лет от землетрясения Вэньчуань, упомянутого в пункте 3.2. разрывы находились на расстоянии около 85 км друг от друга и в определенной степени пострадали от землетрясения в Вэньчуань.

В данной работе используется каталог землетрясений с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2015 г., а также используется метод, описанный в главе 1 данной работы, для прогнозирования и анализа землетрясений.

Эволюция пространственного распределения RTL во времени показана на (рис. 10). Видно, что за 2 года до землетрясения обнаружено затишье в 100 км к западу от эпицентра, а диапазон и интенсивность области аномалии также изменились с малых на большие, а затем и на малые.

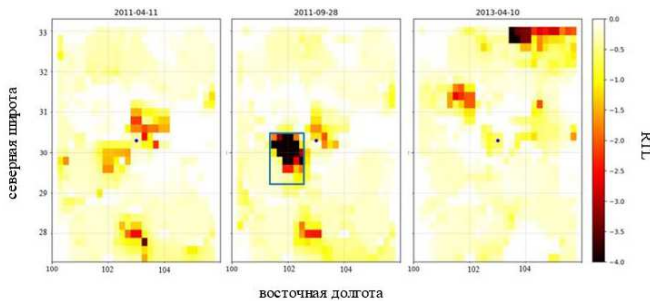


Рис. 10. RTL пространственное распределение, синий прямоугольник — основная аномальная область: 29.2–30.4°N; 101.23–103.67°E

Автор выбрал область с самой сильной аномалией в качестве основной области аномалии (в синем прямоугольнике на рис. 10) и сделал график изменения RTL во времени, как показано на рис. 11. Видно, что самая ранняя аномалия появилась в 2010 г. Через полтора года RTL упал до дна, а затем вернулся к фоновому уровню, за которым последовало Лушаньское землетрясение.

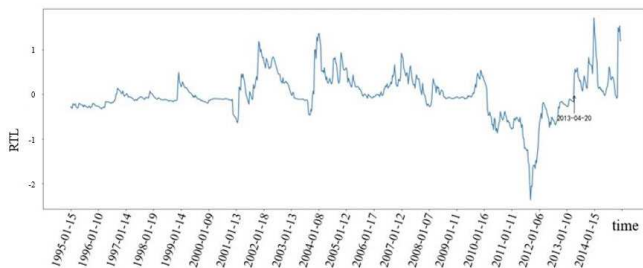


Рис. 11. График RTL в основной аномальной области с течением времени. Диапазон основной зоны аномалии

На графике b -value (рис. 12) видно, что за 7 лет до

землетрясения b -value ненадолго выросло, затем упало до минимума в 2010 г., и землетрясение произошло с возвращением к фоновой интенсивности. Изменение b -value сопровождался повышением уровня сейсмической активности. Из карты пространственного распределения b -value и Z видно, что в юго-восточном направлении от эпицентра перед землетрясением b -value было ниже фонового уровня.

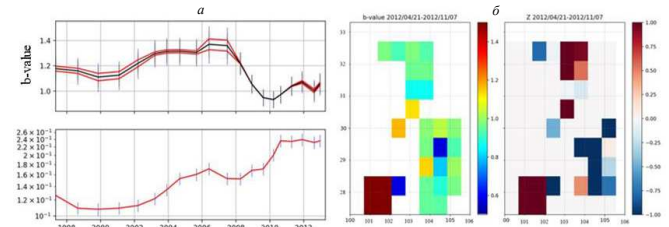


Рис. 12. График анализа b -value: a — график b -value и уровня сейсмической активности во времени; b — график пространственного распределения b -value и Z

Из изображения K_{CP} видно (рис. 13), что в 1996 г. K_{CP} достигла величина критического уровня K_{cp}^{mp} , который может дать долгосрочный прогноз землетрясения за 17 лет до землетрясения.

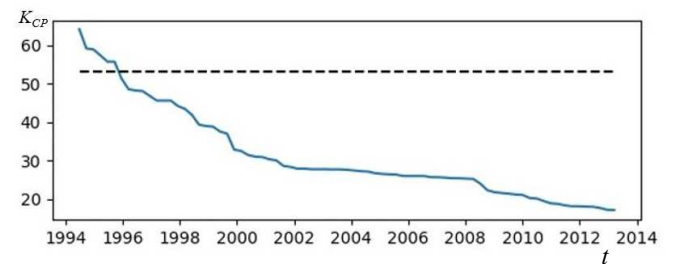


Рис. 13. График K_{CP} во времени, диапазон сканирования: 30.14–30.95°N; 102.74–103.65°E

3.4. Землетрясение 08.08.2017

Землетрясение Цзючжайгоу $M_S7.2$ (8 августа 2017 г.) произошло на пересечении разлома Тазанг, разлома Миньцзян и разлома Хуя, все эти разломы в восточной части зоны разлома Восточный Куньлунь на восточной окраине блока Баян Хар на реке Цинхай. Тибетское плато. Район, где расположен эпицентр, был признан подверженным риску землетрясения высокой магнитуды в 2017 г., но краткосрочный прогноз не был успешно достигнут.

В данной работе используется каталог землетрясений с 1 января 1997 г. по 7 июля 2019 г., а также используется метод, описанный в разд. 1 данной работы, для прогнозирования и анализа землетрясений.

Эволюция пространственного распределения RTL во времени показана на (рис. 14). Видно, что за два года

до землетрясения в 50 км к юго-востоку произошла аномалия. Размер и интенсивность области аномалии достигли максимума за год до землетрясения, а затем уменьшились.

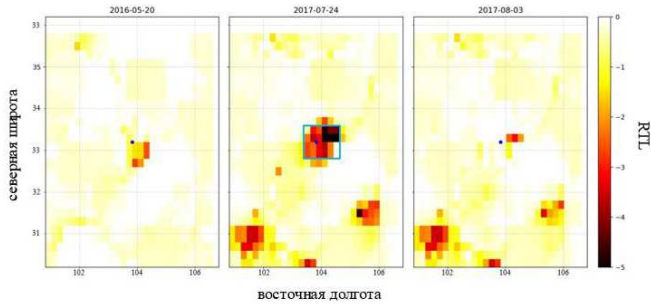


Рис. 14. *RTL* пространственное распределение, синий прямоугольник — основная аномальная область: 32.8–33.6°N; 103.4–104.6°E

Автор выбрал область с самой сильной аномалией в качестве основной области аномалии (в синем прямоугольнике на рис. 14) и сделал график изменения *RTL* во времени, как показано на рис. 15. Видно, что перед землетрясением были падения *RTL*, но землетрясение произошло у дна, поэтому, несмотря на очевидные аномалии сейсмической активности, невозможно дать эффективный прогноз землетрясения на основе изображений *RTL*.

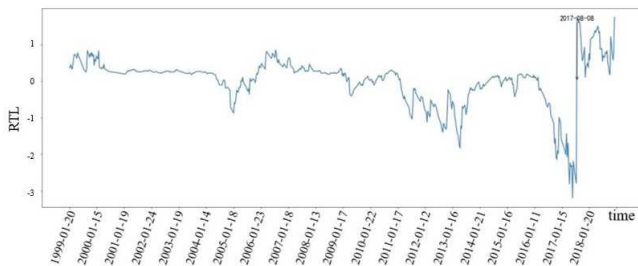


Рис. 15. График *RTL* в основной аномальной области с течением времени. Диапазон основной зоны аномалии

Из графика *b-value* видно (рис. 16), что *b-value* начало расти за три года до землетрясения, достигло пика в 2017 г., а затем начало уменьшаться, а во время спада произошло землетрясение. Изменение *b-value* также сопровождалась сейсмической активностью, поднятием уровня. Из карты распределения *b-value* и *Z* мы видим, что на западе и севере эпицентра перед землетрясением *b-value* было значительно ниже фонового уровня.

Из графика *K_{CP}* видно (рис. 17), что вблизи этого района произошло три крупных землетрясения, а именно землетрясения 2, 3 и 4. Из-за частого возникновения сильных землетрясений, *K_{CP}* снижается очень быстро, согласно данным величина критического уровня *K_{CP}^{mp}*: Для землетрясения в августе 2017 г. *K_{CP}*

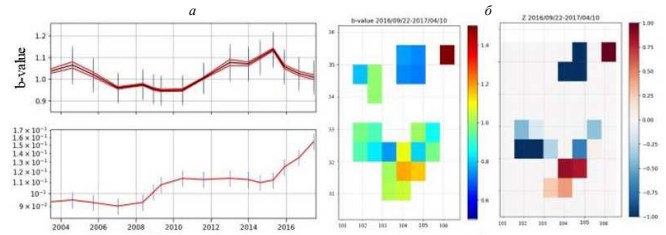


Рис. 16. График анализа *b-value*: а — график *b-value* и уровня сейсмической активности во времени; б — график пространственного распределения *b-value* и *Z*

может давать среднесрочные прогнозы за 2 года до землетрясения.

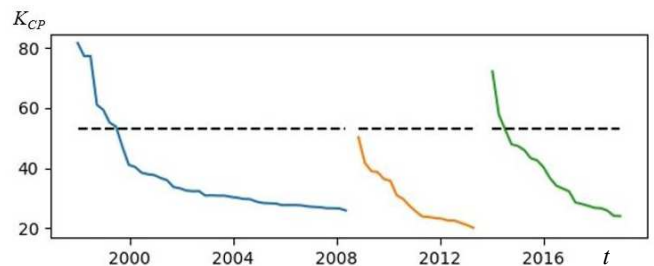


Рис. 17. График *K_{CP}* во времени, диапазон сканирования: 30.2–31.1°N; 102.81–103.85°E

3.5. Землетрясение 17.11.2017

Землетрясение Милин *M_S7.1* (17 июля 2017 г.) произошло на северо-восточном продолжении разлома Дабук в структуре Восточных Гималаев и в зоне разлома Ярлунг Зангбо.

В данной работе используется каталог землетрясений с 1 января 1997 г. по 7 июля 2019 г., а также используется метод, описанный в разд. 1 данной работы, для прогнозирования и анализа землетрясений.

Эволюция пространственного распределения *RTL* во времени показана на рис. 18. Видно, что аномалия начала проявляться за 8 месяцев до землетрясения и достигла своего пика по размаху и силе 3 августа 2017 г.

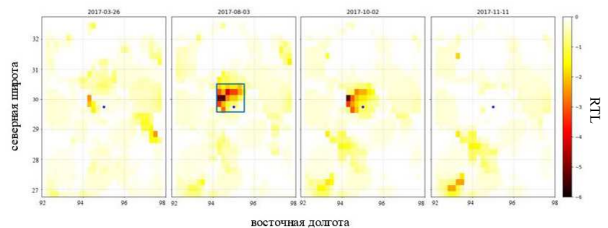


Рис. 18. *RTL* пространственное распределение, синий прямоугольник — основная аномальная область: 29.7–30.6°N; 94.2–95.7°E

Автор выбрал область с самой сильной аномалией в качестве основной области аномалии (в синем прямоугольнике на рис. 18) и сделал график изменения RTL во времени, как показано на рис. 19. Видно, что в зоне основной аномалии не только был период затишья перед землетрясением, но и наблюдалась аномалия повышенной сейсмической активности перед периодом затишья землетрясения. В то же время, когда землетрясение происходит, когда RTL возвращается к фоновому уровню, если RTL достигает дна в качестве точки прогноза, период прогноза составляет 3 месяца.

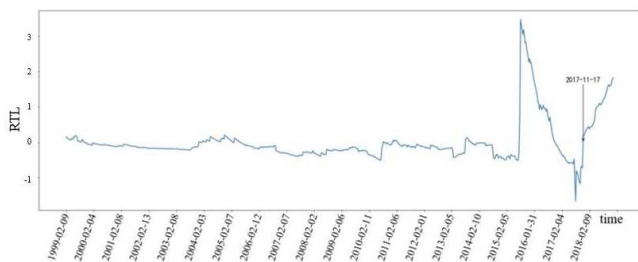


Рис. 19. График RTL в основной аномальной области с течением времени. Диапазон основной зоны аномалии

Из графика b -value видно (рис. 20), что в середине 2013–2015 гг. b -value было на высоком уровне, а затем неуклонно снижалось, и в конце 2017 г. произошло землетрясение, в то время как уровень сейсмической активности продолжал расти до середины 2016 г., а затем медленно снижался. По пространственному распределению b -value и Z видно, что b -value в северной части эпицентра перед землетрясением было ниже фонового уровня.

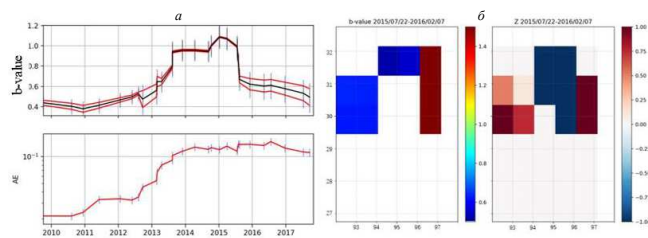


Рис. 20. График анализа b -value. а — график b -value и уровня сейсмической активности во времени; б — график пространственного распределения b -value и Z

Из изображения K_{CP} видно (рис. 21), что в 1996 г. K_{CP} достигла величина критического уровня K_{CP} , который может дать долгосрочный прогноз землетрясения за 17 лет до землетрясения.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Путем анализа сейсмического каталога Китая, проведенного в разд. 3.2, основанного на модели ЛНТ, получены результаты ретроспективного прогноза для

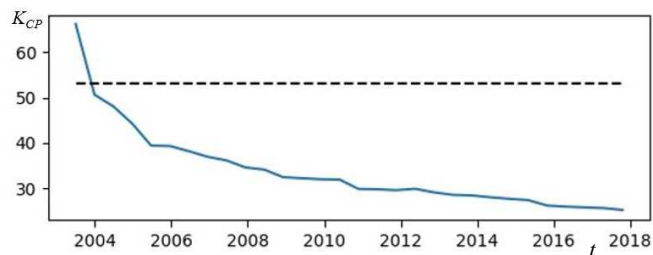


Рис. 21. График K_{CP} во времени, диапазон сканирования: $26.75\text{--}31.25^\circ\text{N}; 92\text{--}97.04^\circ\text{E}$

5-и землетрясений с $M_S \geq 7$. Обобщая полученные результаты, можно составить таблицу времен и расстояний проявления аномалий сейсмического режима, относительно майншока выбранных землетрясений, для каждого прогностического метода. Время проявления аномалии — это момент, когда аномалия только что появилась, а расстояние от области аномалии до эпицентра — расстояние между центром аномальной области RTL и эпицентром прогнозируемого землетрясения. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Возьмем время проявления аномалии RTL первого землетрясения за 3.5 года, расстояние от области аномалии до эпицентра за 2.66° ; аномалия K_{CP} четвертого землетрясения не рассматривается.

Получено:

Средние значения времен проявления аномалий составили:

1. RTL — 2.13,
2. b -value — 3.45;
3. K_{CP} — 13.8.

Расстояние от области аномалии RTL до эпицентра -0.895° .

Пять землетрясений имеют явные аномалии RTL и аномалии K_{CP} . У первого землетрясения b -value не имеет аномалий, но все остальные четыре землетрясения можно спрогнозировать с помощью b -value. Четвертое землетрясение произошло, когда RTL находился во впадине, поэтому было сочтено, что оно не могло дать прогноз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель ЛНТ исходит из фундаментальных положений физики длительной прочности, она не зависит от масштаба явления. В принципе, говорят, что модель ЛНТ подходит для всех работ по прогнозу землетрясений, но записей о применении модели в Китае не так много, поэтому эта работа может проверить соответствие модели при анализе китайского каталога землетрясений. Результаты показывают, что модель подходит для землетрясений, выбранных по критерию > 7 и произошедших в Китае.

Таблица 3. Время проявления аномалии и время выпуска прогноза

№	Время проявления аномалии			Расстояние от области аномалии до эпицентра
	<i>RTL</i>	<i>b-value</i>	<i>K_{CP}</i>	<i>RTL</i> ($1^\circ \approx 111.1$ км)
1	3–4 года	–	15 лет	2.75/2.57
2	1 год	3 года	18 лет	1.35
3	2 года	6 лет	17 лет	0.3
4	1.67 года	2 года	2 года	0.054
5	2.5 лет	2.8 лет	17 лет	0.11

Программа, предоставленная Смирновым В.Б., была использована для расчета *RTL*, *b-value* и *K_{CP}*. Результаты показали, что аномалии *b-value* были в четырех землетрясениях, а аномалии *RTL* и аномалии *K_{CP}* возникли во всех пяти землетрясениях. Средние значения времен проявления аномалий составили: *RTL* — 2.13 г.; *b-value* — 3.45 лет; *K_{CP}* — 16.75 лет. Среднее расстояние между областью основной аномалии *RTL* и эпицентром: 0.895° (табл. 3).

Анализ проводился 15 раз, в 14 раз получили ожидаемые аномалии. Порядок появления аномалий: $K_{CP} > b\text{-value} > RTL$, что соответствует описанию модели ЛНТ. А время появления аномалии близко к среднему времени — 2.13 г., что имеет большую исследовательскую ценность. Мы можем считать, что аномалии *RTL*, аномалии *b-value* и ано-

малии *K_{CP}* являются эффективными предвестниками землетрясений.

В расчетах мы также пришли к выводу, что изменение параметров *RTL* в разумных пределах может привести только к изменению числовой величины и не повлияет на конечный результат. Изменение окна сканирования *b-value* будет иметь определенное влияние на конечный результат, который может быть связан с плотностью данных и методом расчета.

Автор выражает благодарность профессору В.Б. Смирнову.

Работа выполнена при финансовой поддержке Китайского стипендиального совета (грант 202108090202). Результаты работы докладывались на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов–2022».

-
- [1] Smith W.D. // Nature.1981. **289**(5794), P. 136.
- [2] Li Quan-Lin, Chen Jin-Biao, Yu Lv, Hao Bai-Lin. // Chinese Journal Of Geophysics. 1987. **21**(02). P. 101.
- [3] 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.
- [4] Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. // Вулканология и сейсмология. 1996. N 4. С. 64. (Sobolev G.A., Tyupkin Y.S. // Volc. Seism. 1997. **18**. P. 433).
- [5] Соболев Г.А. // Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993.
- [6] Sobolev G.A., Tyupkin Y.S. // Volcanol. Seismol. 1999. **20**. P. 615.
- [7] Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. 2nd ed. Princeton N.J. Princeton Univ. Pr., 1954.
- [8] Scholz C.H. // Bull. Seismol. Soc. Am. 1968. **58**(1). P. 399.
- [9] Mori J., Abercrombie R.E. // J. Geophys. Res. 1997. **102**(B7). P. 15081.
- [10] Гусев А.А. // К истолкованию закона повторяемости землетрясений. Душанбе: б.н., 1960. Труды ТИССС. 1960. **6**, С. 41.
- [11] Ли Цюаньлинь, Чен Цзиньбяо, Юй Лу и др. // Китайский журнал геофизики. 1978. **21**(2). P. 101.
- [12] Felzer K. // Calculating the Gutenberg-richter b-value. USGS publication. 2007.
- [13] Чжан Цзяньчжун, Сун Ляньюй. // Acta Seismological Journal. 1981. **3**(3). P. 292.
- [14] Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. **6**. P. 11.
- [15] Смирнов В.Б. // Геофизические исследования. 2009. **10**. № 2. С. 7.
- [16] Смирнов В.Б. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 3, С. 59.
- [17] Liu Yue, Lu Xiao-jian, Tian Qin-jian // EARTHQUAKE, 2016. **36**(2). P. 94.
- [18] Huang Q H. // Geophysics Res Lett. 2008. **35**(23). L23308. doi: 10.1029 / 2008GL036270
- [19] Завьялов А.Д. // ФТТ. 2005. **47**, № 6. С. 1000.
- [20] Smirnov V.B., Zaviyalov A.D. // Volc. seism. 1997. **18**. P. 447.

Seismic anomalies according to the catalog of earthquakes in China

Gao Fengkai

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: gao.f19@physics.msu.ru

This paper considers earthquake anomalies for five strong earthquakes in China (Xinjiang-Yutian earthquake $M_S7.3$, Wenchuan earthquake $M_S8.0$, Lushan earthquake $M_S7.15$, Jiuzhaigou earthquake $M_S7.2$, and Milin earthquake $M_S7.1$). Based on the avalanche unstable fracture formation model (AUF), three different prediction methods are Gutenberg–Richter relation (*b-value*), regional-time-length algorithm (RTL) and seismogenic rupture concentration (K_{CP}). Spatiotemporal distribution analysis of precursor anomalies before strong earthquakes shows that RTL and K_{CP} anomalies are detected before all earthquakes, and *b-value* anomalies are found before 4 earthquakes. The average times between the occurrence of anomalies and the occurrence of earthquakes were: RTL — 2.13 years; *b-value* — 3.45 years; K_{CP} — 16.75 years. Average distance between the region of the main RTL anomaly and the epicenter: 0.895° . The results show that the seismic prediction method based on the model AUF is applicable to the geological conditions of China and that the time of anomalies preceding an earthquake indicates the probability of an earthquake occurring.

PACS: 91.30.pd.

Keywords: seismic anomalies, Catalog of earthquakes in China, LNT, RTL, *b-value*, K_{CP} .

Received 19 May 2022.

Сведения об авторе

Гао Фэнкай — аспирант; e-mail: gao.f19@physics.msu.ru.
