

## Исследование прогностических аномалий наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна и Варна

А.И. Половникова\*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики Земли. Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 16.07.2024)

Сейсмическая активность является одним из наиболее опасных и нестабильных природных явлений нашей планеты. Исследования в области сейсмологии имеют большое значение для минимизации рисков, связанных с землетрясениями и повышения качества их прогноза. Наведенная сейсмичность относится к землетрясениям, которые вызваны человеческой деятельностью. Примером такой деятельности является строительство и использование гидротехнических сооружений, например дамб или водохранилищ. В процессе подготовки сильных землетрясений меняется распределение сейсмических событий в пространственно-временной области и их энергетического спектра. Такие изменения называют аномалиями сейсмического режима, их можно обнаруживать путем анализа параметров сейсмичности, которые косвенно описывают состояние геофизической среды. Несмотря на высокую фундаментальную и практическую значимость, анализу прогностических аномалий в наведенной сейсмичности посвящено немного публикаций. В настоящей работе рассматривается вопрос о наличии или отсутствии аномалий сейсмического режима перед землетрясениями в области наведенной сейсмичности. Исследования проводятся для сильных землетрясений в районе водохранилищ Койна и Варна в Индии. Проводится предварительная подготовка каталога, контроль представительной магнитуды, расчет пространственных карт параметров сейсмичности. Полученные результаты могут быть использованы для разработки эффективных мер по уменьшению рисков и обеспечению безопасности населения, а также могут прояснить некоторые особенности процесса подготовки землетрясений в районах наведенной сейсмичности.

PACS: 91.30.-f

УДК: 550.3

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, прогностические аномалии, параметр  $b$ -value, параметр RTL, сейсмический режим.

### ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике сейсмологических исследований усиливается интерес к анализу аномалий сейсмического режима перед относительно сильными землетрясениями. Одними из часто используемых статистических параметров являются функция RTL и характеристика  $b$ -value (наклон графика повторяемости), которые количественно описывают состояние геофизической среды и в ряде случаев помогают спрогнозировать сейсмическую активность. В данной статье рассмотрена методика исследования прогностических аномалий наведенной сейсмичности в районе водохранилищ Койна и Варна, обсуждаются полученные расчетные результаты.

Данная область уже рассматривалась ранее [1], при этом проводился поиск прогностических аномалий в районе водохранилищ Койна-Варна только для параметра RTL. В данной работе расширена совокупность рассматриваемых землетрясений, кроме того рассмотрены прогностические аномалии, описанные функцией  $b$ -value.

### 1. ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТЕ

В работе используются два статистических параметра, которые часто применяются для анализа сейсмического режима в районах с различными тектоническими типами. Первый — параметр RTL [2], учитывающий распределение землетрясений во времени, пространстве и по энергиям. Второй — параметр Гутенберга-Рихтера ( $b$ -value) [7], определяет наклон распределения магнитуд землетрясений. Оба этих параметра основаны на модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [6], которая качественно описывает стадии подготовки землетрясений.

#### 1.1. Параметр RTL

Для выявления наступления стадий затишья и форшоковой активизации, Г.А.Соболев предложил уникальный метод под названием алгоритм RTL [2] Суть метода заключается в том, что каждое произошедшее землетрясение оказывает влияние на геофизическую среду, причем это влияние зависит от ряда факторов. Значение функции RTL определяется как произведение трех безразмерных множителей:  $R$ ,  $T$  и  $L$ , учитывающих различные характеристики: расстояние от заданной точки до эпицентра, время возникновения земле-

\* polovnikova.ai22@physics.msu.ru

трясения и размер его очага. Эти величины определяют степень влияния каждого произошедшего землетрясения на заданную точку геофизической среды. Функция RTL рассчитывается следующим образом:

$$R(x, y, t) = \left[ \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_{tr}(x, y, t),$$
$$T(x, y, t) = \left[ \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{r_0}\right) \right] - T_{tr}(x, y, t),$$
$$L(x, y, t) = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{l_0} \right] - L_{tr}(x, y, t),$$

где  $r_i$  — расстояние между точкой  $\{x, y\}$  и эпицентром  $i$ -го землетрясения,  $r_0$  — характерное расстояние,  $R_{tr}(x, y, t)$  — временной тренд функции  $R(x, y, t)$  за расчетный период,  $t_i$  — время возникновения  $i$ -го землетрясения,  $t_0$  — характерный временной интервал,  $T_{tr}(x, y, t)$  — временной тренд функции  $T(x, y, t)$  за расчетный период,  $l_i$  — размер очага  $i$ -го землетрясения, полученный из соотношения с магнитудой  $M_i$ :  $\log l_i = 0.5M_i - 1.8$ , а  $L_{tr}(x, y, t)$  — тренд  $L(x, y, t)$  за расчетный период. Целое число  $n$  — это количество землетрясений, удовлетворяющих следующим критериям:

$$M_i \geq M_{min}, r_i \leq R_{max}, t - t_i \leq T_{max},$$

где  $M_{min}$  — предельная магнитуда, обеспечивающая полноту каталога землетрясений после декластеризации, а  $R_{max}$  и  $T_{max}$  — максимальные расстояние и временной интервал до землетрясений, которые учитываются в расчете.

Увеличение RTL указывает на сейсмическую активизацию, в то время как падение свидетельствует о затишье. Восстановление значений до нулевой отметки после падения также характеризует сейсмическую активизацию, вызванную форшоковыми событиями. Метод RTL был успешно применен для анализа аномальных пространственно-временных областей перед сильными землетрясениями сейсмоактивных регионах с разными тектоническими типами [3, 7].

Настроечные коэффициенты  $r_0$ ,  $t_0$  выбирались по литературным данным, в данной работе принято коэффициенты  $r_0 = 1 - 5$  км,  $t_0 = 1$  год. Это помогает снизить долю ложных аномалий и повысить их контрастность. Также подход позволяет более точно определить время начала стадии затишья и повысить надежность результатов исследований.

Расчеты проведены с использованием открытого программного обеспечения PyRTL (<https://gitlab.com/Mr.Brain/PyRTL>).

### 1.2. Параметр Гутенберга–Рихтера

Значение наклона графика повторяемости (b-value) отражает соотношение между энергетически сильными

и слабыми сейсмическими событиями, а его изменения могут указывать на приближающееся макро-разрушение. Этот параметр является важным индикатором при оценке состояния сейсмической активности, так как изменения b-value свидетельствуют об перераспределении сейсмических событий в энергетической области. Параметр b-value возникает из закона Гутенберга–Рихтера, выражаемого соотношением  $\log(N(M)) = a - bM$ , где  $M$  — магнитуда,  $N(M)$  — количество землетрясений с магнитудой  $\geq M$ ,  $a$  и  $b$  определяют относительное количество землетрясений различной магнитуды.

«Образом предвестника» является понижение величины параметра Гутенберга–Рихтера (иногда следующее за его небольшим увеличением), которое указывает на объединение и укрупнение очагов землетрясений перед сильным землетрясением. В сейсмической статистике это проявляется увеличением доли крупных землетрясений, что отражается в уменьшении величины  $b$ . Для расчета наклона графика повторяемости используется модифицированная методика оценки максимального правдоподобия, учитывающая усеченность распределения землетрясений по магнитудам [3].

Расчеты проведены с использованием открытого программного обеспечения PyBvalue: <https://gitlab.com/Mr.Brain/py-bvalue>.

## 2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа отобраны три землетрясения из каталога MERI, они произошли 12.03.2000, 16.09.2008 и 14.04.2012 и имеют магнитуду 5.2, 5.2 и 5.0 соответственно. На рис. 1 представлены результаты расчета параметров b-value и RTL: для каждого землетрясения приведены пространственные карты распределения параметров в момент наибольшего проявления аномалий, и временные графики, построенные в центре пятна аномалии. Перед всеми землетрясениями выявлены пространственно-временные аномальные области, параметры которых соответствуют типичным значениям для среднесрочных предвестников физического типа.

После анализа данных в каталоге было определено, что в 2000 г. произошел дублет землетрясений с разницей в пару месяцев. По результатам анализа обнаружены аномалии сейсмического режима перед этими событиями. Из-за малой задержки между событиями не удается отделить аномалии связанные с первым землетрясением, от аномалий, относящихся ко второму. Возможно, анализ наземных геофизических наблюдений может способствовать выделению аномальных периодов перед двумя отдельными событиями.

Пространственно-временные аномальные области имеют среднюю длительность 0.8–1 год для RTL и 0.42–0.9 года для b-value. При выявлении аномалий использовались схожие параметры: расчетный радиус 2–7 км, пороговая магнитуда выбиралась исходя из оценки представительности каталога и равна 2.

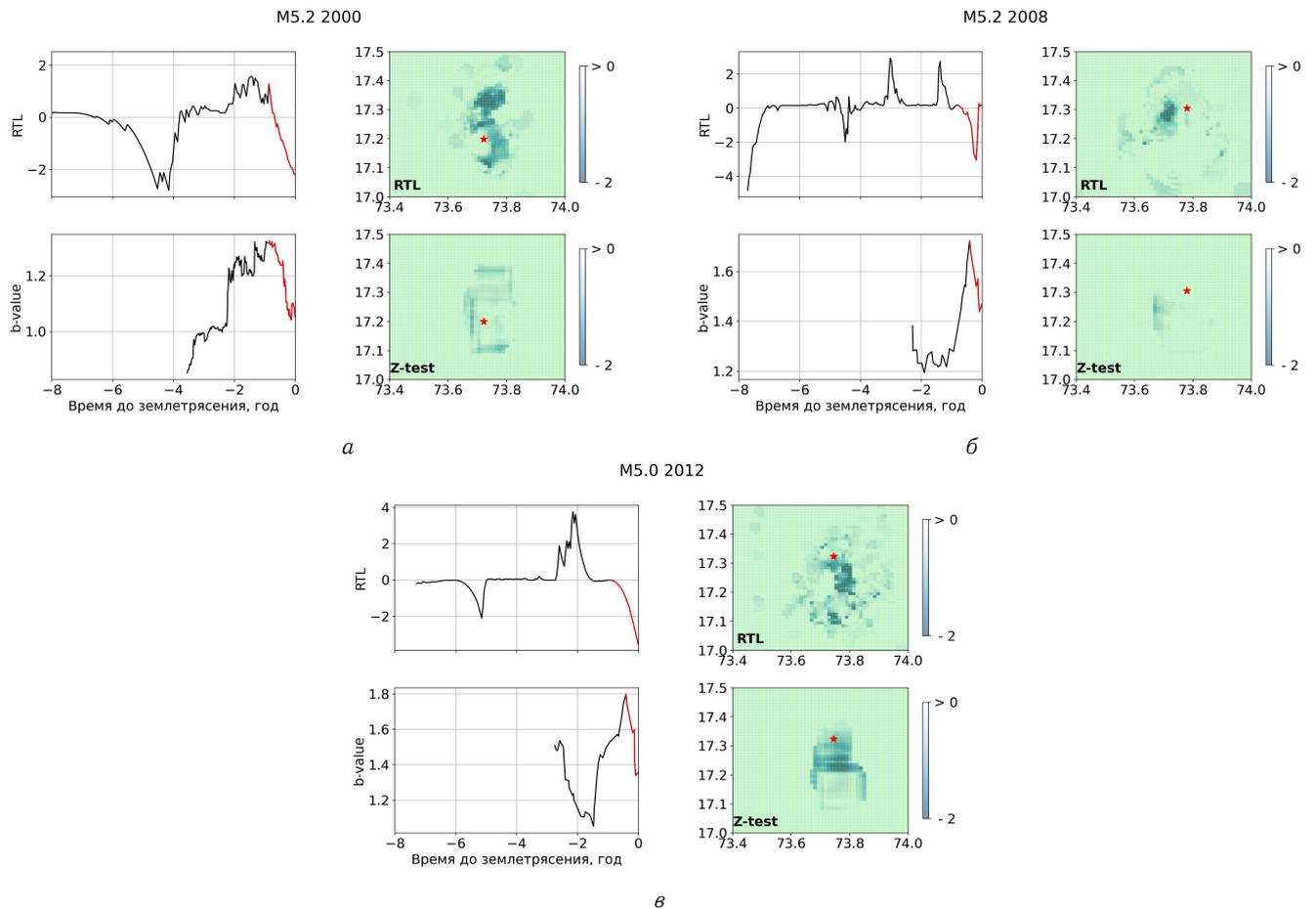


Рис. 1. Графики зависимостей параметров сейсмического режима от времени, а также карты распределения выявленных прогностических аномалий, соответствующих параметрам  $b$ -value и  $RTL$  перед отобранными землетрясениями. На графиках красной линией выделены аномалии. На картах звездочкой обозначен эпицентр землетрясений, справа обозначен масштаб цветовой шкалы.  $a$ – $в$  – разные землетрясения: 2000, 2008 и 2012 гг. соответственно

Для параметра  $RTL$  были выбраны  $t_0 = 365$  дней,  $r_0 = 1 - 5$  км,  $l_0 = 10$  км,  $p = 1$ . Для оценки параметра  $b$ -value выбрано расчетное окно в 600–1000 дней.

Перед некоторыми землетрясениями, не вошедшими в выборку, аномалий найдено не было. Это землетрясения, магнитуда которых меньше 5, что может быть связано с недостатком статистики в каталоге для надежной оценки параметров сейсмического режима в их очаговой области.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ аномалий сейсмического режима перед землетрясениями в области наведен-

ной сейсмичности. Исследование проведено в области водохранилищ Койна и Варна в Индии. Перед относительно сильными землетрясениями с магнитудой  $\geq 5$  обнаружены устойчивые аномалии для сейсмических параметров  $RTL$  и  $b$ -value. Временной ход аномалий соответствует образам предвестников. Проведена оценка длительностей аномалий, полученные результаты соответствуют типичным значениями длительности для среднесрочных предвестников физического типа.

За помощь в выполнении работы автор выражает благодарность: профессору физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова В.Б.Смирнову, студенту магистратуры физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова А.А.Петрушову.

- [1] Смирнов В.Б., Chadha R.K., Пономарев А.В., Srinagesh D. // Физика Земли. № 2, 94 (2013).  
 [2] Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С., Смирнов В.Б., Завялов А.Д.

- // Докл. Акад. Наук. **347**, № 3. 405 (1996).  
 [3] Смирнов В.Б., Петрушов А.А., // Физика Земли. № 5. 62 (2023).

- [4] Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН, 2020. 412 с.
- [5] Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993.
- [6] Myachkin V.I., Sobolev G.A., Dolbilkina N.A. et al. // Tectonophysics, **14** (3), 287 (1972).
- [7] Arora K., Chadha R.K., Srinu Y. et al. // Journal Geological Society of India. **90**. 670 (2017).

## Investigation of prognostic anomalies of induced seismicity in the Koina and Varna reservoirs

**A.I. Polovnikova**

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia  
E-mail: polovnikova.ai22@physics.msu.ru*

In this paper, the question of the presence or absence of anomalies of the seismic regime before earthquakes in the field of induced seismicity is considered. Studies are being conducted for strong earthquakes in the area of Koina and Varna reservoirs in India. Preliminary preparation of the catalog is carried out, control of the representative magnitude, calculation of spatial maps of seismicity parameters. The results obtained can be used to develop effective measures to reduce risks and ensure the safety of the population, and can also clarify some features of the earthquake preparation process in areas of induced seismicity.

PACS: 91.30.-f

*Keywords:* induced seismicity, prognostic anomalies, b-value parameter, RTL parameter, seismic mode.

*Received 09 June 2024.*

### Сведения об авторе

Половникова Анастасия Ивановна — студентка; e-mail: polovnikova.ai22@physics.msu.ru.