

УДК 550.34+550.240

## СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

© 2025 г. Е. А. Левина\*, В. В. Ружич\*\*

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия**\*E-mail: levina@crust.irk.ru**\*\*E-mail: ruzhich@crust.irk.ru*

Для целей среднесрочного прогноза землетрясений рассмотрена модель их подготовки в геодинамических условиях Байкальской рифтовой зоны. Основой модели являются сейсмогеологические признаки: наличие сейсмической бреши, активного разлома или разломного узла, а также предшествующей предшоковой активности и последующего затишья перед шоком. При анализе используются каталог землетрясений и перечень активных разломов. Успешность прогноза по параметрам «место» и «энергия» составляет  $\approx 70\%$ . Самым сложным является параметр «время». Обсуждаются причины и некоторые возможности решения проблем, связанных с оценкой времени ожидания прогнозируемого землетрясения, которые обусловлены совокупностью ряда действующих природных факторов.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** среднесрочный прогноз землетрясений, сейсмогеологические признаки подготовки землетрясений, время ожидания землетрясения.

**Для цитирования:** Левина Е.А., Ружич В.В. Сейсмогеологические признаки подготовки землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 1. С. 1–11. [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2025\\_17\\_1\\_1](https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_1)

### Введение

Произошедшие в феврале 2023 г. в Турции землетрясения с  $M > 7$ , приведшие к огромным материальным потерям и человеческим жертвам, в очередной раз показали актуальность проблемы прогноза землетрясений, что необходимо для своевременной оценки сейсмической опасности и выбора превентивных мер для снижения ущерба. Как известно, для прогноза поведения любой системы необходимо составить ее модель, учитывающую основные влияющие на нее факторы. Прогноз может быть краткосрочным (дни, часы), среднесрочным (месяцы, годы) и долгосрочным (десятилетия). До настоящего времени в двух последних видах прогноза достигнуты отдельные успехи [Ружич, 1997; Завьялов, 2006; Соболев, 2011; Ружич, Левина, 2022; Kossobokov, Shebalin, 2003] и др. В этой работе в кратком изложении представлены результаты, касающиеся, в основном, совершенствования методов среднесрочного прогноза опасных землетрясений применительно к сеймотектонической обстановке на территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

Любой прогноз землетрясений должен содержать три параметра – указание на место его возникновения, энергию и время ожидания. В Институте земной коры в целях прогноза разработана ГИС «Prediction» [Левина, 2011]. Для этого привлекались, накопленные за многие годы исследований, сведения об основных сейсмогеологических признаках, предшествующих возникновению землетрясений. Они выявлены при детальном геолого-геофизическом изучении сейсмодислокаций в очагах современных и эксгумированных палеоземлетрясений на территории БРЗ. Для выяснения механизмов возникновения сейсмогеологических предвестников землетрясений в рамках междисциплинарного и международного сотрудничества проводились тектонофизические эксперименты в ледовой среде Байкала и на реальных сегментах зон разломов [Добрецов и др., 2011; Кочарян, 2016; 2021; Ружич, Кочарян, 2017; Ружич, Левина, 2022; Psakhie et al., 2005; Ostaruchuk et al., 2019].

<sup>1</sup> По материалам доклада на VII Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах».

## Метод и исходные данные

Существует множество определений, что такое модель. Авторы используют следующее: «Объект  $Q$  является моделью объекта  $A$  относительно некоторой системы характеристик  $S$ , если  $Q$  имитирует  $A$  по этим характеристикам» [Кудрявцев, 1977].

В данном случае объект  $A$  – это сейсмический режим в геодинамических условиях БРЗ. В качестве системы характеристик  $S$  рассматривались следующие прогнозные признаки: 1 – наличие сейсмической брешы, 2 – наличие сейсмоактивного разлома или разломного узла, 3 – наличие предшоковой активизации.

Использовался каталог землетрясений БРЗ, предоставленный Байкальским филиалом Единой Геофизической службы РАН (г. Иркутск). Каталог землетрясений фактически является представленной в табличной форме функцией вида  $E = f(\varphi, \lambda, t)$ , где  $E$  – энергия события,  $\varphi, \lambda$  – его географические координаты,  $t$  – время, когда событие произошло. Исследовать функцию трех переменных сложно, поэтому применен метод снижения размерности. Для учета геологического признака 2 необходим перечень сейсмоактивных разломов с указанием координат и степени их активности.

Для обнаружения сейсмических брешей (признак 1) строится распределение сейсмической энергии, подсчитанное за определенный промежуток времени с помощью пространственного окна. То есть рассматриваемая функция приобретает вид  $E = f(\varphi, \lambda)$  и задача сводится к поиску локальных минимумов в полученной матрице. Выявленные минимумы считаются брешью, если в соответствующем окне есть фрагмент разлома или разломного узла (признак 2). Поиск брешы – основа для выявления места возможного землетрясения: предполагается, что она соответствует временно заблокированному сегменту сейсмоактивного разлома.

Для оценки параметров энергии и времени ожидания использовалась феноменологическая двухстадийная модель подготовки землетрясения, разработанная на основе натуральных экспериментов на разломах и подтвержденная анализом режимов подготовки реальных событий в БРЗ [Ружич, 1997; Ружич, Левина, 2022; Ruzhich et al., 2014; Ostapchuk et al., 2019].

Предложенная авторами двухстадийная модель финальной фазы подготовки землетрясений основывается на кинетической концепции прочности твердых тел, изначально представленной в работе С. Н. Журкова [Журков, 1968]. Позднее концепция использовалась в работах многих последователей [Журков и др., 1977; Куксенко и др., 1985; Соболев, 1987; Ружич, Хилько, 1987; Ружич, 1997; Соболев, Пономарев, 1999; Соболев, 2019] и др. В ней используется фундаментальный закон длительной прочности и отмечен стадийный режим подготовки землетрясений посредством поэтапного объединения разрывов разных рангов. В нашей практике такой механизм распознавался при изучении режима динамического разрушения ледяного покрова оз. Байкал в виде ледовых ударов, во многом сходных со слабыми землетрясениями [Добрецов и др., 2011]. При подготовке ударов сейсмическими станциями неизменно фиксировались две стадии: предшествующей сейсмической активизации и стадии сейсмического затишья. Они возникали на разных масштабных уровнях по мере поэтапного разрастания магистральных трещин в ледяном покрове с протяженностью в десятки км [Ruzhich et al., 2009; Ruzhich, 2014]. Аналогичный механизм подготовки спонтанного разрушения сходным образом проявлялся при проведении натуральных экспериментов при разрушении неровностей в моменты скольжения бетонного блока по шероховатой поверхности разломов [Ружич и др., 2014; Ostapchuk et al., 2019]. При оперативном мониторинге сейсмического режима подготовки землетрясений в БРЗ в течение двух десятилетий также фиксировался двухстадийный механизм подготовки в виде поэтапных высокоскоростных переходов от косейсмических разрывов низшего ранга к последующим, более высоким.

Согласно этой модели землетрясению («шоку»), как правило, предшествует стадия предшоковой сейсмической активизации и сейсмическое затишье (рис. 1). Предполагается, что по максимальной энергии событий в предшоковой стадии и длительности затишья можно судить об энергии ожидаемого землетрясения и времени его реализации (признак 3). С этой целью для определенной территории

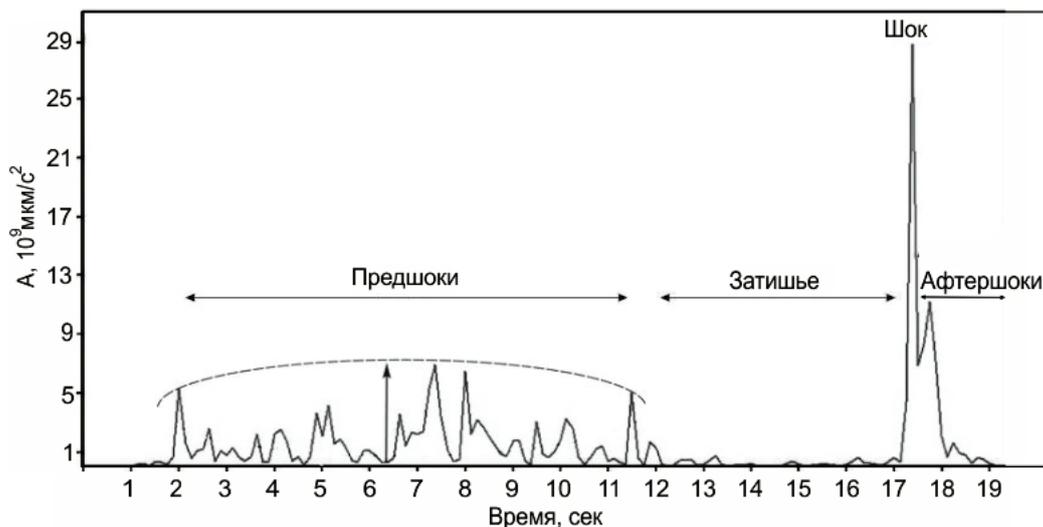


Рис. 1. Выявленные при натуральных экспериментах характерные стадии подготовки шока: предшоковая активизация и последующее затишье

строится распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное с помощью временного окна. В этом случае выше упомянутая функция сводится к виду  $E = f(t)$  и поиск предшоковой активизации заключается в нахождении локального максимума временного ряда.

Расчеты, сделанные для всех 16 событий с  $K \geq 15$ , произошедших в БРЗ с 1963 по 2022 гг., показали, что наличие длительно существующей брешы в зоне протяженного активного разлома или разломного узла, может служить весомым основанием для формализованного способа выявления мест ожидаемых землетрясений: все они произошли либо в самой брешы, либо в ячейке активизации, соседней с брешью. То есть, при использовании пространственного окна со стороной  $D^0$  местом возможного землетрясения является область со стороной  $3 \times D^0$ .

При этом соотношение энергии произошедшего землетрясения  $K_3$  и энергии максимального землетрясения предшоковой стадии  $K_{пр}$  составляет в среднем  $K_3 - K_{пр} = 2.3 (0.7)$ , где в скобках указано среднее квадратичное отклонение (рис. 2). Выявленное соотношение пригодно для оценки энергии ожидаемого землетрясения по энергетическому уровню предшоковой стадии.

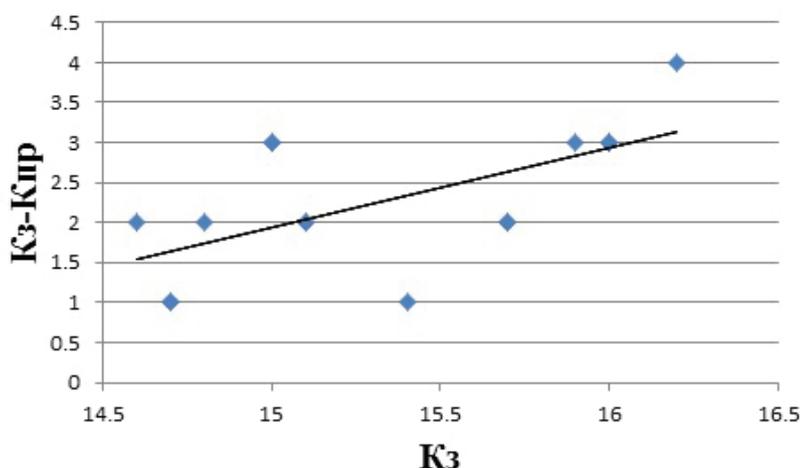
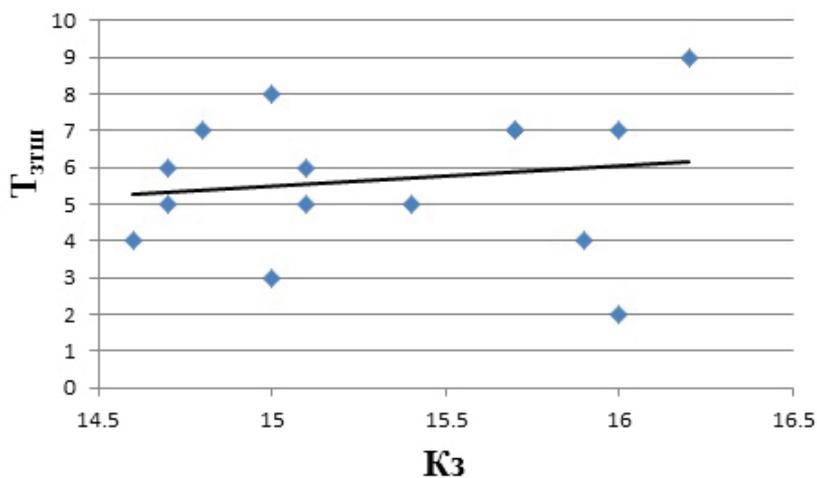


Рис. 2. Соотношение энергии произошедшего землетрясения  $K_3$  и энергии максимального землетрясения предшоковой стадии  $K_{пр}$

Наблюдаемые соотношения между временем затишья  $T_{зти}$  и энергией последующего землетрясения показаны на рис. 3. Средняя длительность затишья  $T_{зти} = 5.7 (3.4)$  лет.

Разброс длительности затишья достаточно большой, так как он обусловлен многообразными условиями деструктивного контактного взаимодействия неровностей в сегментах разломов. Особенно



**Рис. 3.** Соотношение между временем затишья  $T_{зтш}$  и энергией последующего землетрясения  $K_z$

это касается проявления еще мало изученных сейсмогеологических механизмов, возникающих в местах сочленения разломов разной ориентации, степени активности и характера смещений [Ружич, 1984; Ружич, 1997]. Выявленный разброс времени ожидания от 2 до 9 лет для землетрясения  $K \geq 15$  укладывается в рамки среднесрочного прогноза.

Для уточнения параметра «время» необходимо привлекать дополнительную информацию, например, учитывать вариации современного скоростного режима смещений в выявленных сейсмоопасных сегментах разломов [Matsuda, 1975; Моги, 1979]. Такой критерий характеризует режим накопления тектонических деформаций и упругой энергии в крыльях изучаемого сегмента разлома. Особенно информативен возрастающий градиент скорости современных смещений для сегментов, в которых фиксируется скорость порядка 1–2 мм/год или более. При его проявлениях в сегменте разлома в области сейсмической брешы и сведений о возрасте поздней палеосейсмодислокации возникает возможность оценивать примерную длительность периода ожидания очередного опасного землетрясения. В большинстве случаев без наличия подобных сведений оценки сейсмической опасности и ожидаемого опасного землетрясения не являются достаточно обоснованными.

Байкальская рифтовая зона нами рассматривается как длительно формирующийся рифтогенный мегаразлом в литосфере Центральной Азии, обусловленный комбинированным воздействием на земную кору местного мантийного источника, стимулирующего растяжение земной коры, а также сил планетарного сжатия земного шара [Ружич, 1997]. Отсюда не случайно в разных ее участках фиксируются различные особенности напряженного состояния земной коры. На современной стадии геодинамического развития БРЗ режим характерного горизонтального растяжения земной коры, проявляющийся в виде сбросов, фиксируется, в основном, в центральном сегменте БРЗ, где располагается протяженная Байкальская впадина. В юго-западном и северо-восточном сегментах мегаразлома наряду со сбросами фиксируются надвиги и взбросо-сдвиги, возникновение которых обусловлено влиянием планетарных сил. Для детального анализа в пределах БРЗ целесообразнее выделять три следующих сегмента: юго-западный, северо-восточный и центральный с учетом современной специфики их сеймотектонической эволюции [Ружич, 1997].

В Таблице 1 приведены значения  $K_z - K_{пр}$  и  $T_{зтш}$ , вычисленные для каждого из субрегионов.

Таблица 1.

	$K_z - K_{пр}$	$T_{зтш}$ (годы)
Юго-запад	2.3 (1.2)	7 (1.5)
Байкал	2.5 (0.3)	4 (0)
Северо-восток	2.1 (0.1)	6 (3)

Видно, что для центрального сегмента БРЗ среднее время ожидания меньше, а  $K_3 - K_{np}$  больше, чем на флангах. Вероятнее всего эти различия обусловлены геомеханическими особенностями современных тектонических режимов деструкции в разных сегментах Байкальской рифтовой зоны.

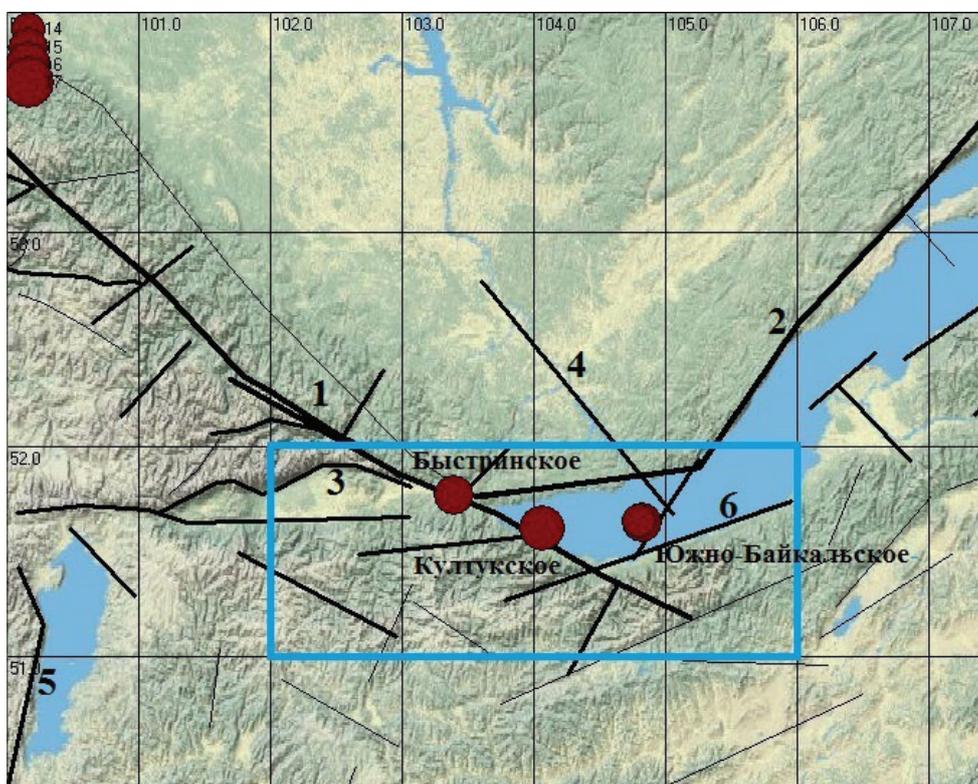
### Результаты

Для проверки модели на адекватность рассмотрены ее возможности по имитации прогноза «вперед» на примере трех землетрясений, которые произошли в районе южной оконечности оз. Байкал с интервалом  $\approx 10$  лет (рис. 4).

Параметры этих событий приведены в Таблице 2.

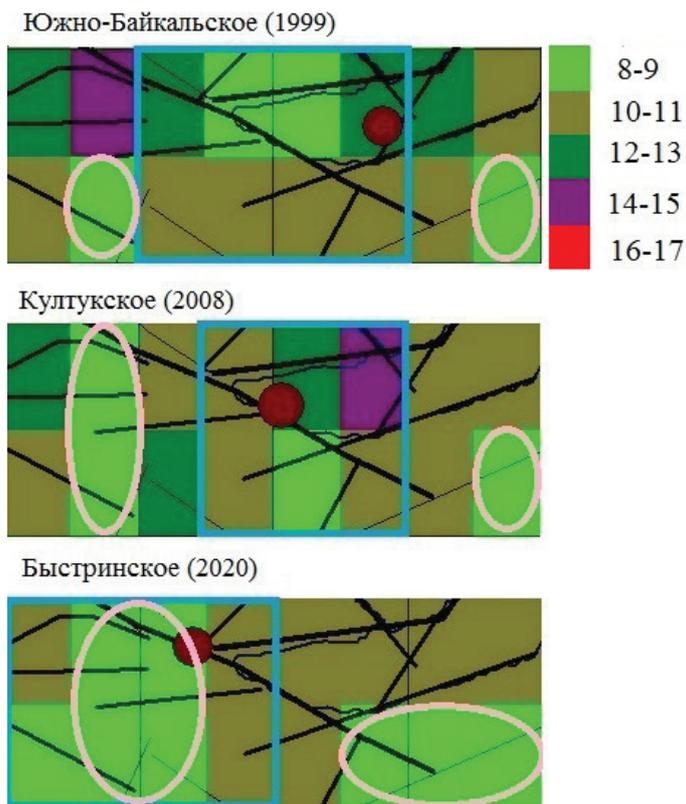
Таблица 2.

	Дата	$\varphi$	$\lambda$	К
Южно-Байкальское	25.02.1999	51.64	104.82	14.6
Култукское	27.08.2008	51.61	104.07	15.9
Быстринское	21.09.2020	51.77	103.40	14.5

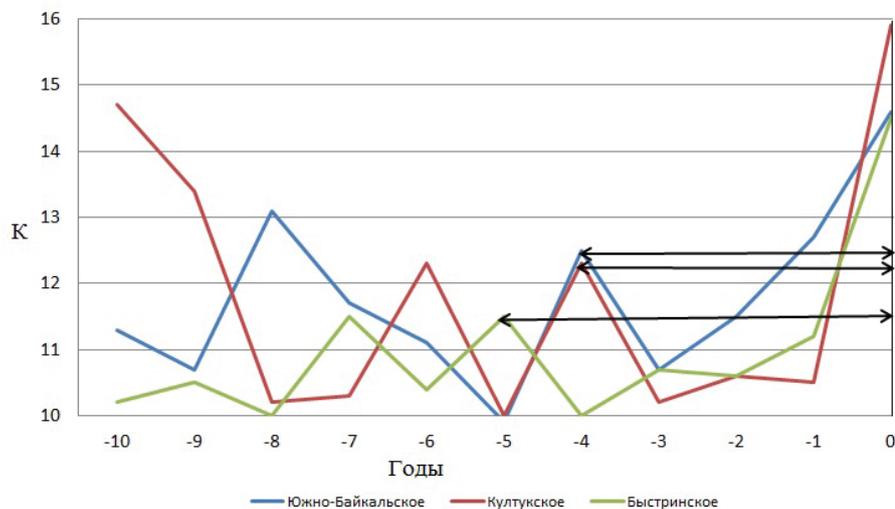


**Рис. 4.** Карта с эпицентрами Южно-Байкальского, Култукского и Быстринского землетрясений (красные кружки). Синим прямоугольником ограничена рассматриваемая далее область. Черными линиями показаны разломы, основные из них обозначены цифрами: 1 – Главный Саянский, 2 – Приморский, 3 – Тункинский, 4 – Ангарский, 5 – Хубсугульский, 6 – Хамар-Дабанский

Анализируется область  $51^\circ \leq \varphi \leq 52^\circ$  и  $102^\circ \leq \lambda \leq 106^\circ$  (рис. 5). Распределение выделившейся сейсмической энергии подсчитывалось с помощью пространственного окна со стороной  $0.5^\circ$  за 11 лет, предшествующих 1 января года, когда произошло землетрясение. Синими прямоугольниками показаны области, выделенные, как места возможных землетрясений. Видно, что все три события попали в указанные опасные места.



**Рис. 5.** Области с эпицентрами Южно-Байкальского, Култукского и Быстринского землетрясений (красные кружки) и распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное с помощью окна  $0.5^\circ$  за 11 предшествующих лет



**Рис. 6.** Распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное в окнах со стороной  $2^\circ$  с центрами в эпицентрах Южно-Байкальского, Култукского и Быстринского землетрясений за 11 предшествующих лет. Черными стрелками показаны периоды затишья

Энергию и время ожидания оценим на основании графиков на рис. 6. На них показано распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное в окнах со стороной  $2^\circ$  с центрами в эпицентрах Южно-Байкальского, Култукского и Быстринского землетрясений за 11 предшествующих лет.

Результаты сведены в Таблицу 3. Видно, что все три рассмотренных события произошли в прогнозируемые промежутки времени. Энергия соответствует указанным диапазонам для Южно-Байкальского и Быстринского землетрясений, но у Култукского она оказалась выше верхней границы диапазона.

Но в рассмотренной области выявлены еще две брешы, имеющие все три прогнозных признака, назовем их условно восточная (справа) и западная (слева), на рис. 5 они выделены розовыми овалами.

Таблица 3.

	$K_{пр}$	$T_{этп}$	Ожидаемое $K_3$	Период ожидания	Произошло $K_3$	Произошло $T$
Южно-Байкальское	12.5	4	14.1–15.5	0–5	14.6	2 месяца
Култукское	12.3	4	13.9–15.3	0–5	15.9	8 месяцев
Быстринское	11.5	5	13.8–14.5	0–4	14.5	9 месяцев

Западная брешь перед Быстринским землетрясением существовала не менее 31 года (1988–2019 гг.). Восточная брешь существует тоже с 1988 года, землетрясения в ней пока не произошло (35 лет).

Рассмотрим теперь ситуацию по состоянию на 01.01.2024 г. (рис. 7). Обе эти бреши продолжают существовать, причем, западная – несмотря на произошедшее Быстринское землетрясение. Но рядом с обеими брешами в 2021–2023 гг. произошли землетрясения 12–13 классов, которые можно рассматривать как предшоки (ячейки темно-зеленого цвета на рис. 7), после которых через стадии затишья возможно проявление землетрясений более высокого энергетического уровня. Прогноз по состоянию на 01.01.2024 г. для этой области может выглядеть таким образом: район ожидания выделен синим; энергия:  $K_{пр} = 12.5$ ,  $K_3$  ожидается 14.1–15.5; время для западной бреши – от 0 до 6 лет (предшок в 2021 г.); для восточной бреши – от 2 до 8 лет (предшок в 2023 г.).



Рис. 7. Распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное с помощью окна  $0.5^\circ$  за период 2013–2023 гг.

### Обсуждение результатов

Из приведенных примеров видно, что все три рассмотренных землетрясения могли быть предсказаны с помощью обсуждаемой модели. Но все прогнозные признаки присутствуют также в местах, где землетрясение произошло позднее или еще не произошло. Подобные неоднозначные решения во многом обусловлены неточностью оценки времени ожидания события. Таким образом, можно констатировать, что используемые сейсмогеологические прогнозные признаки являются необходимым, но недостаточным условием реализации землетрясения в указанный период ожидания. Проблемы в оценках параметра «время» рассматривались во многих работах, в частности, в [Ружич и др., 2002]. Согласно представлениям, изложенным в работе [Pulinets, Ouzounov, 2018], для перехода в критическое состояние системе необходимо получить пороговую энергию  $E$ . Иногда это происходит без какого-либо внешнего воздействия в результате внутренней эволюции системы. Но бывает, что система не достигла необходимого уровня  $E$  на небольшую величину  $\Delta E$ , однако получает ее за счет внешнего воздействия и достигает критического состояния через триггерный эффект. Но, если внешнее воздействие может уменьшить количество энергии, тогда системе потребуется дополнительное время для ее восстановления и землетрясение произойдет позже или оно может вообще не произойти.

В качестве триггеров могут выступать самые различные явления. Например, известно влияние на сейсмический режим в разломах минимумов и максимумов 11-летнего цикла солнечной активности. В работе [Khain, Khalilov, 2008] ее авторы установили, что в периоды повышения солнечной активности увеличивается сейсмическая активность в зонах сжатия Земли и одновременно снижается активность в зонах растяжения. Три рассмотренных выше землетрясения произошли в первый, второй и одиннадцатый годы разных солнечных циклов, то есть вблизи их минимумов.

Можно предположить, что имеет место триггерный «эффект бабочки Брэдбери»: свойство хаотичных систем, в результате которого незначительное влияние на систему может иметь большие и непредсказуемые последствия, причем в другом месте и отсроченные по времени. То, что невозможно учесть всю совокупность факторов, способных влиять на сложную природную систему геомеханических процессов в разломах при подготовке землетрясений, приводит к затруднениям в оценке параметра «время».

### Заключение и выводы

Формализованное авторами выделение сейсмических брешей в сочетании с наличием сейсмоактивных разломов и разломных узлов позволило установить, что все события с  $K \geq 15$ , произошедшие в БРЗ с 1963 по 2022 гг., произошли либо в самой бреше, либо в ячейке активизации, соседней с брешью. Для всех событий с  $K \geq 15$  имела место предшоковая активизация. Анализ показал, что выявленное соотношение энергии предшоковой стадии и самого шока в деталях может различаться в разных частях БРЗ, такие отличия можно использовать для уточнения оценки энергии ожидаемого события. Связь длительности сейсмического затишья с энергией последующего землетрясения определяется менее надежно из-за существующего в земной коре разнообразия в условиях подготовки очагов землетрясений в сегментах БРЗ. Поэтому для уточнения параметра времени ожидания землетрясения требуется привлечение дополнительной информации.

Для дальнейшего совершенствования предложенной модели требуется организация более детальных и плотных сетей сейсмометрических и геолого-геофизических полигонов в сейсмоопасных местах, выявленных при среднесрочном прогнозе.

По мнению авторов в сфере практических приложений для уточнения параметра «время» на созданных геодинамических полигонах необходим мониторинг скоростного режима смещений в разломах, происходящих на сейсмофокальном уровне в режиме реального времени, с применением аппаратуры высокого разрешения. Большое значение имеет информация о деформометрических, сейсмоакустических и гидрогеологических предвестниках. Также целесообразно проведение геофизических наблюдений, например, средствами магнитно-теллурического зондирования.

Не стоит забывать весьма трагические последствия двух разрушительных землетрясений в Турции, где в течение многих десятилетий, несмотря на многие признаки нарастания сейсмической опасности, систематически нарушались необходимые нормы строительства жилых и промышленных сооружений [Ружич, Бержинская, 2023] и др. Подобные ситуации возможны в Байкальской рифтовой зоне, где уже происходили катастрофические землетрясения, например, 10-балльное Цаганское в 1862 г. ( $M = 7.5$ ) и 10–11-балльное Муйское ( $M = 7.9$ ) в 1957 г. Важно отметить, что без надлежащей государственной поддержки организовать надежное противостояние подземной стихии не удастся.

### Финансирование

*Работа подготовлена в рамках базового проекта «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (№ FWEF-2021-0009) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).*

### Список литературы

- Добрецов Н.Л., Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О совершенствовании способов прогноза землетрясений средствами физического моделирования в ледовом покрове Байкала // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 4. С. 69–79. <https://www.elibrary.ru/obgmcj>
- Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С. 45–52.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18.

- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М. : Наука, 2006. – 254 с.
- Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41. <https://doi.org/10.31857/S0002333721040062>
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 432 с.
- Кудрявцев Л.Д. Мысли о современной математике и её изучении. М. : Наука. 1977. – 112 с.
- Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Мансуров В.А. и др. Закономерности развития микроочага разрушения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 7. С. 87–93.
- Левина Е.А. Геоинформационная система для прогноза землетрясений и горных ударов: разработка и примеры применения в Байкальской рифтовой зоне и Норильском месторождении / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Специальность 25.00.35 – Геоинформатика, Иркутск. 2011. – 19 с.
- Ружич В.В. Сеймотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Изд-во СО РАН. 1997. – 144 с.
- Ружич В.В., Берзинская Л.П., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О причинах возникновения и последствиях двух разрушительных землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3. № 1. С. 22–34. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.22>
- Ружич В.В. К вопросу об оценке сейсмического потенциала разломных узлов сейсмоактивных областей: тезисы докладов Всесоюзного совещания «Сейсмическое районирование территории СССР и изучение сильных землетрясений» (Кишинев, Институт геологии и геофизики АН Молдавской ССР, 1984). Кишинев. 1984. С. 58–60.
- Ружич В.В., Баясгалан А., Смекалин О.П., Имаев В.С., Баяр Г., Морозова А.А. О длительности периодов повторяемости сильных землетрясений в Монголии: Материалы III Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике. Иркутск : ИСЗФ СО РАН. 2002. С. 51–53.
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г. О строении и формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Статья I. Приповерхностный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 1021–1034. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0330>
- Ружич В.В., Левина Е.А. О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах. 2022. № 1. С. 17–28. [http://doi.org/10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_17](http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_17)
- Ружич В.В., Хилько С.Д. Анализ моделей очагов землетрясений с сейсмогеологических позиций // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М. : Наука. 1987. С. 113–122.
- Ружич В.В., Черных Е.Н., Пономарева Е.И. Экспериментальное моделирование механизмов возникновения источников сейсмических колебаний при взаимодействии неровностей в разломах // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 563–576. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0141>
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М. : ИФЗ РАН, 2011. – 56 с.
- Соболев Г.А. Исследование разрушения барьеров применительно к проблеме прогноза землетрясений // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М. : Наука, 1987. С. 58–67.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Акустическая эмиссия и стадии подготовки трещин в лабораторном эксперименте // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 50–62. <https://www.elibrary.ru/sgjvnh>
- Khain V. E., Khalilov E.N. About possible influence of solar activity upon seismic and volcanic activities: long-term forecast. Science without borders: Transactions of the International Academy of Science. H & E. Vol. 3. 2007–2008. SWB. Innsbruck. 2009. ISBN 978-9952-451-01-6 ISSN 2070-0334.
- Kossobokov V.G., Shebalin V.P. Earthquake Prediction. In: Keilis-Borok V.I. and A.A. Soloviev (Editors). Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. Springer. Heidelberg. 2003. P. 141–207. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3_4)
- Matsuda T. Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault // J. Seism. Soc. Jpn. 1975. Vol. 28 (2). P. 269–283. [https://doi.org/10.4294/zisin1948.28.3\\_269](https://doi.org/10.4294/zisin1948.28.3_269)
- Mogi K. Two kinds of seismic gaps // PAGEOPH. 1979. V. 117. P. 1172–1186. <https://doi.org/10.1007/BF00876213>
- Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V. et al. Seismic-acoustics of a block sliding along a fault // Pure and Applied Geophysics. 2019. P. 163–168. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1>
- Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Dimaki A.V., Astafurov S.V., Lopatin V.V. Influence of the state of interfaces on the character of local displacements in fault-block and interfacial media // Technical Physics Letters. 2005. Vol. 31 (8). P. 712–715. <https://doi.org/10.1134/1.2035374>

*Pulinets S., Ouzourov D.* The Possibility of Earthquake Forecasting. IOP Publishing. Bristol. UK. 2018. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1248-6>

*Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Bornyakov S.A., Granin N.G.* Deformation and seismic effects in the ice cover of Lake Baikal // Russian Geology and Geophysics. 2009. Vol. 50 (3). P. 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.08.005>

*Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Shilko E.V., Levina E.A., Ponomareva E.I.* Physical Modeling of Seismic Source Generation in Failure of Fault Asperities // Physical Mesomechanics. 2014. Vol. 17. P. 274–281. <https://doi.org/10.1134/S1029959914040043>

*Sobolev S.A.* Avalanche unstable fracturing formation model // Izv. Phys. Solid Earth. 2019. Vol. 55. P. 138–151. <https://doi.org/10.1134/S1069351319010117>

## **SEISMOGEOLOGICAL FEATURES OF EARTHQUAKE PREPARATION IN THE BAIKAL RIFT ZONE**

© 2025 E. A. Levina\*, V. V. Ruzhich\*\*

*Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

*\*E-mail: levina@crust.irk.ru*

*\*\*E-mail: ruzhich@crust.irk.ru*

For the purposes of medium-term earthquake forecasting, a model of their preparation in the geodynamic conditions of the Baikal rift zone is considered. The model is based on seismogeological features: the presence of a seismic gap, an active fault or fault node, as well as previous pre-shock activity and subsequent calm before the shock. The analysis uses a catalog of earthquakes and a list of active faults. The success of the forecast for the «place» and «energy» parameters is  $\approx 70\%$ . The most difficult parameter is «time». The causes and some possible solutions to problems associated with assessing the waiting time of a predicted earthquake, which are caused by a combination of a number of active natural factors, are discussed.

**Keywords:** medium-term earthquake forecast, seismogeological signs of earthquake preparation, earthquake waiting time.