



УДК 519.254+50.34.(013.4+042.4)  
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.23.64>

## Основные критерии выделения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона

А. В. Ключевский, А. А. Какоурова

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

**Аннотация.** В рамках базовой модели мигрирующей сейсмичности численными методами определены критерии выделения цепочек землетрясений в эпицентральных полях различной геометрии и структуры распределения толчков. Развиваемая модель дополняет исследование миграций очагов землетрясений – позволяет установить критерии сейсмомиграций как превышение средних чисел цепочек, созданных случайным пространственно-временным распределением толчков. В качестве прототипа пространственно-временного и энергетического распределения имитационных событий использована сейсмичность Байкальского региона. При моделировании «площадного» распределения имитационные события генерировались случайным образом с постоянной плотностью вероятности в площадках круглой формы. «Полосовое» распределение выполнено для площадок прямоугольной формы: вдоль площадок имитационные события генерировались случайным образом с постоянной плотностью вероятности, а поперек площадки – по нормальному закону. Представленные в виде графиков, таблиц и уравнений критерии «значимости» и «представительности» дают возможность параметризовать процедуру выделения цепочек миграции землетрясений в эпицентральной зоне сейсмичности Байкальского региона и в зоне разломов. В перспективе это дает возможность получения однородной информации для непосредственного сопоставления миграционной активности различных территорий как характеристики современной геодинамики и тектонофизики литосферы, а также для поиска предвестника сильного землетрясения. Разработанные методики, реализованные программы и полученные результаты закладывают теоретическую и практическую основу технологии изучения миграции очагов землетрясений в литосфере Байкальского региона.

**Ключевые слова:** Байкальский регион, литосфера, зона разлома, цепочки землетрясений, базовая модель мигрирующей сейсмичности, критерии выделения цепочек.

**Для цитирования:** Ключевский А. В., Какоурова А. А. Основные критерии выделения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 23. С. 64–73. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.23.64>

### Введение

Современная компьютеризация позволяет обрабатывать большие объемы данных с целью получения новых знаний о природе и свойствах сейсмичности. Эти знания закладываются в теоретическую основу современной научной базы наук о Земле и используются при анализе пространственно-временной и энергетической структуры сейсмичности, являющейся основным источником информации при оценке сейсмической опасности и сейсмическом районировании территорий. В ходе решения этих задач многомерное пространство параметров землетрясений диагностируется путем

совместного анализа моделей, феноменологии и экспериментальных данных при использовании процедур и понятий скейлинга, самоподобия, пространственно-временной корреляции, откликов на возбуждение, предсказуемости на различных масштабах и миграции очагов землетрясений [Ключевский, Зуев, 2007; Проблемы динамики литосферы ... , 2001]. Повышенное внимание к проблеме миграции очагов землетрясений обусловлено тем, что в этом явлении имеется потенциальная возможность прогноза сильных землетрясений достаточно простыми методами мониторинга сейсмичности: локализация и динамика процесса миграции очагов землетрясений хорошо вписываются в рамки модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (модель ЛНТ) с подготовкой и реализацией сильного землетрясения [Основы физики очага ... , 1975]. Явление миграции очагов землетрясений стало широко известно после публикации Ч. Рихтера [1963], в которой описано смещение эпицентров сильных землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома в Турции. В рамках этого явления сведения о квазилинейных цепочках сильных толчков использовались для прогноза землетрясений и характеристики сейсмогеодинамики литосферы [Бот, 1986; Вилькович, Губерман, Кейлис-Борок, 1974; Касахара, 1985]. Под цепочкой миграции землетрясений понимается квазилинейное одностороннее перемещение положения последовательных во времени эпицентров толчков на поверхности литосферы. Поскольку область сеймотектонической деструкции является квазилинейной разломной зоной, такое перемещение может отражать поступательное направленное в одну сторону изменение расположения очагов землетрясений вдоль зоны (или поверхности) разлома, вызванное продвижением деформационных волн.

### **Постановка задачи**

Компьютеризация дает возможность детального изучения миграции очагов землетрясений на большом фактическом материале, если представления о миграции как о поступательном перемещении гипоцентров сейсмических событий вдоль зоны разлома перенести на слабые толчки. В этом случае необходимо решить проблему формализованного выделения цепочек миграции землетрясений, которую можно разделить на две части: задачу выделения цепочки в эпицентральной поле толчков [Ключевский, Какоурова, Демьянович, 2017]; задачу определения критериев выделения цепочек при переменных и неоднородных входных данных, присущих реальной сейсмичности. В данной работе основные критерии выделения цепочек землетрясений в литосфере Байкальского региона определены в рамках имитационной базовой модели мигрирующей сейсмичности.

### **Объект исследования**

Мы исследуем миграции очагов землетрясений в литосфере Байкальского региона, являющегося чрезвычайно опасным в сейсмическом отношении. Исследованиями сейсмичности региона установлено, что количество эпицентров землетрясений  $N$  в площадках одного размера и формы (плотность эпицентров землетрясений) сильно варьирует [Ключевский, 2007; Ключевский, Зуев, 2007]. Такие вариации  $N$  не позволяют выполнить коррект-

ное сопоставление миграционной активности различных территорий, и для решения этой задачи нами разработана описанная в данной статье модель.

### Методика исследований

Чтобы определить критерии выделения цепочек землетрясений в зависимости от объема  $N$  выборки толчков в площадке (блоке литосферы), числа  $m$  землетрясений в цепочке, размеров угла сектора  $q$  по азимуту  $\alpha$  миграции и расположения  $r$  цепочки в зоне разлома, нами разработана имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности. В модели учитываются основные элементы и свойства мигрирующей сейсмичности, а эпицентры синтезированных  $N$  событий генерируются на поверхности площадки круглой и прямоугольной формы. В круглой площадке радиуса  $R = 100$  км события генерируются в виде случайного поля с постоянной плотностью вероятности (рис. 1, а). В условиях разломно-блочной литосферы заданный случайный вид распределения событий отражает стохастичность координат эпицентров землетрясений. Близкий характер распределения землетрясений наблюдается на юго-западном фланге Байкальского региона, где клеточная размерность рассеянного по территории эпицентрального поля равна  $D_0 \approx 1,60 \pm 0,02$  [Ключевский, Зуев, 2007]. В заданном азимуте  $\alpha$  в сектор углового размера  $q$  вставляется цепочка последовательных событий (выборка размером  $m \geq 3$ ), имитирующих миграцию очагов землетрясений. В прямоугольной площадке длиной 100 и шириной 60 км вдоль разлома  $N$  событий имеют случайное распределение с постоянной плотностью вероятности, а поперёк разлома задано нормальное распределение (рис. 1, б). Аналог такого распределения землетрясений имеется на северо-восточном фланге Байкальского региона, где  $D_0 \approx 1,37 \pm 0,02$  и толчки сконцентрированы в узкой полосе контакта Сибирской платформы и Амурского блока [Ключевский, Зуев, 2007]. Прямоугольная зона разлома делится продольно на шесть полос шириной в 10 км, и в одну из полос на расстоянии  $r = 5$  (15 или 25) км от линии разлома вставляется цепочка длиной  $m \geq 3$  событий, имитирующая миграцию толчков параллельно разлому. Такое деление связано с тем, что погрешности определения координат эпицентров толчков в Байкальском регионе составляют около 10 км. Кроме того, при нормальном распределении событий поперек зоны разлома в каждой полосе будет генерироваться статистически определенная часть от полной выборки данных.

### Результаты исследований и обсуждение

Для получения одного решения в анализе использовалось постоянное количество  $10^5$  событий, число событий в сериях генераций  $N$  изменялось от 10 до  $10^3$ . В цикле выполняются серии генераций (от  $10^2 = 10^5/10^3$  до  $10^4 = 10^5/10$ ) наборов данных разной длины  $N$ , вставляются цепочки из  $m = 3-10$  событий, меняются величины  $\alpha$ ,  $q$  и  $r$ , и на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей и гипотезы эргодичности динамической системы сейсмичности [Ключевский, Демьянович, Ключевская, 2015] устанавливаются корреляционные связи между входными (перечисленными выше) и выходными параметрами (критерии «значимости» и

«представительности») выборки данных. Результаты вычислений суммировались по секторам или полосам, а затем были осуществлены необходимые статистические оценки и определены основные критерии выделения цепочек миграции землетрясений. Критерий «значимости» выделения цепочки  $\Delta p = \frac{N_p - M}{\sigma}$  определен как отношение разности количества землетрясений  $N_p$  в секторе (или полосе) с цепочкой и математического ожидания  $M$  к стандартному отклонению  $\sigma$  числа событий в площадках и характеризует долю превышения разности  $N_p - M$  в значениях  $\sigma$ . Критерий «представительности» определен как число землетрясений  $N_{пр}$ , необходимых для выделения цепочки, и позволяет в сложном эпицентральной поле толчков реализовать однородное выделение цепочки определенной длины  $n$  при заданном критерии «значимости»  $\Delta p$ .

В качестве примера на рис. 2 представлены графики и тренды критерия «значимости»  $\Delta p$  выделения цепочки из  $m = 3$  событий в угловых секторах  $q = 10, 15$  и  $30^\circ$  и (1–3) и на расстоянии  $r = 5, 15$  и  $25$  км от линии разлома (4–6) в выборках из сгенерированных  $N$  событий. Видно, что с уменьшением  $N$  уровень  $\Delta p$  нарастает по степенному закону и особенно быстро при небольших  $N$ . Критерий  $\Delta p$  нарастает при уменьшении угловых секторов  $q$  и удалении  $r$  полосы от линии разлома, что также обусловлено уменьшением  $N$ . Результаты вычислений при различных значениях  $q, r$  и  $m$  обобщены в табл. 1 в виде уравнений корреляции  $\Delta p$  и  $N$ , имеющих показатель степени около  $-0,5$  при высоких коэффициентах корреляции  $\rho$ .

Для определения критерия «представительности»  $N_{пр}$  выделения цепочки из  $m$  толчков в угловых секторах  $q = 10, 15$  и  $30^\circ$  (1–3) и на расстоянии  $r = 5, 15$  и  $25$  км от линии разлома (4–6) при  $\Delta p = 1$  на рис. 3 представлены графики и тренды чисел событий  $N$ . При аппроксимации опробованы степенной и линейный тренды и получено, что коэффициенты корреляции выше для степенных зависимостей, и линейные тренды уходят в область отрицательных значений  $N$ . Поэтому мы приняли, что с увеличением  $m$  графики и тренды  $N$  нарастают по степенному закону. С уменьшением  $q$  и ростом  $r$  количество  $N$  землетрясений в выборке должно увеличиваться, чтобы выделить цепочку из  $m$  событий при фиксированном  $\Delta p$ . Результаты вычислений при различных значениях  $q, r$  и  $\Delta p$  обобщены в табл. 2 в виде уравнений корреляции  $N$  и  $m$ , имеющих показатель степени в диапазоне  $1,77-2,97$  при высоких коэффициентах корреляции  $\rho$ . Флуктуации показателя степени связаны в основном с разной детальностью статистики при изменяющейся частоте реализаций для больших и малых  $N$ .

В табл. 3 представлены результаты определения критерия «представительности»  $N_{пр}$ , полученные по формулам из табл. 2. Эти результаты дают возможность путем подбора размера площадки по критерию  $N_{пр}$  осуществить в неоднородном эпицентральной поле реальной сейсмичности однородное выделение цепочек из  $m$  землетрясений в заданном секторе  $q$  при критерии «значимости»  $\Delta p$ . Такой «нормированный» подход к решению задачи позволяет в дальнейшем получить карту относительной плотности

распределения цепочек и по количеству выделенных цепочек выполнить сопоставление уровней миграции очагов землетрясений на различных территориях, охарактеризовав таким образом геодинамическую и миграционную активность литосферы. Учет параметра  $r$  дает возможность выполнить такие сопоставления в зонах разломов и проследить динамику развития цепочки с целью поиска предвестника сильного землетрясения.

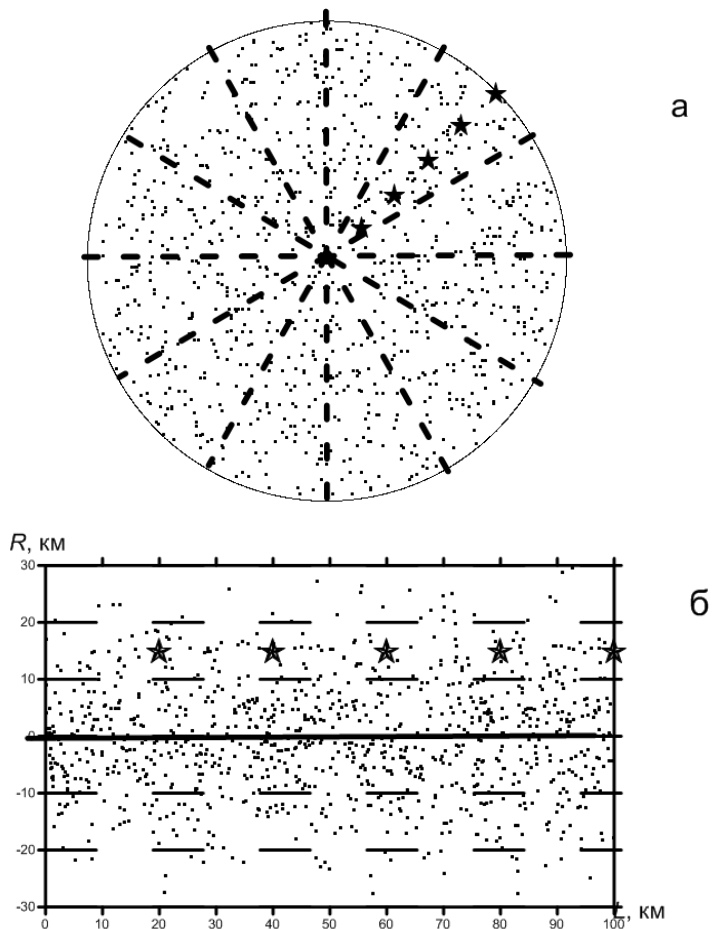


Рис. 1. Эпицентральное поле (а) и разломная зона (б) синтезированных 1000 событий  
 а – эпицентры распределены случайно с постоянной плотностью вероятности. В азимуте  $\alpha = 45^\circ$  вставлена цепочка из пяти сейсмических событий (звёздочки). Угловые секторы  $q = 30^\circ$  выделены штриховыми линиями;

б – вдоль разломной зоны эпицентры распределены случайно с постоянной плотностью вероятности, поперек разломной зоны задано нормальное распределение. Звездочками показана вставленная на расстоянии  $r = 5$  км от линии разлома цепочка из пяти сейсмических событий. Разлом показан сплошной линией, а зона разлома разделена на шесть полос штриховыми линиями.

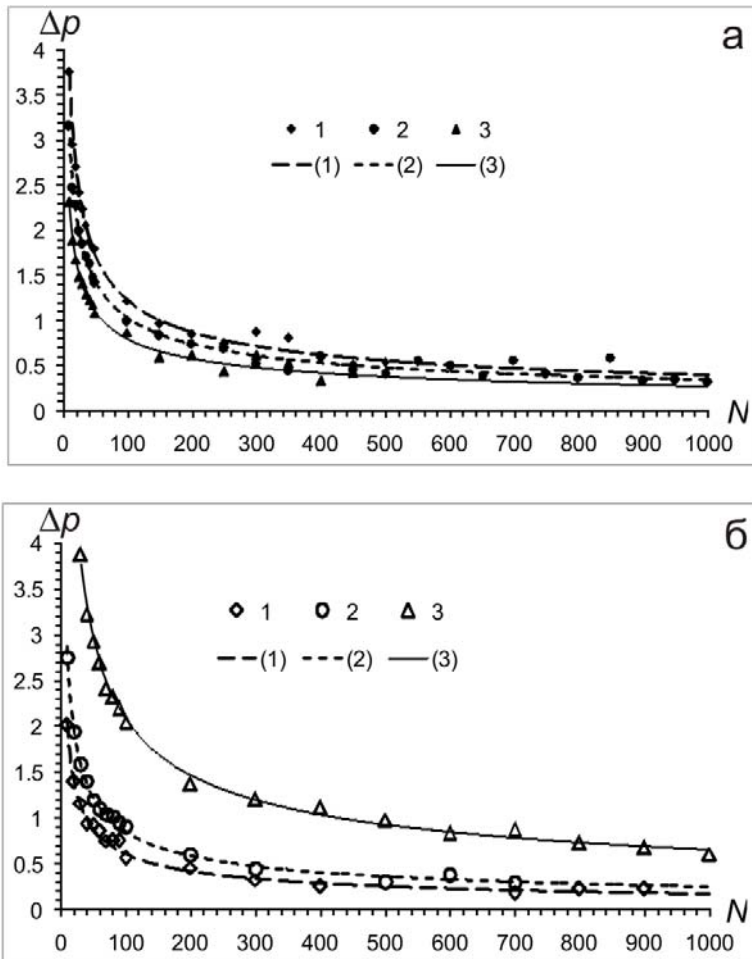


Рис. 2. Графики и тренды критерия «значимости»  $\Delta p$  выделения цепочки из  $m = 3$  событий в угловых секторах  $q = 10, 15$  и  $30^\circ$  (1–3 соответственно) (а) и на расстоянии  $r = 5, 15$  и  $25$  км от линии разлома (1–3 соответственно) (б) в выборках из сгенерированных  $N$  событий

Таблица 1

Уравнения корреляции  $\Delta p$  и  $N$  при различных значениях  $q, r$  и  $m$

$m$	$q = 10^\circ$	$q = 15^\circ$	$q = 30^\circ$
3	$\Delta p \approx 11,46N^{-0,48}, \rho \approx 0,98$	$\Delta p \approx 8,84N^{-0,46}, \rho \approx 0,96$	$\Delta p \approx 6,46N^{-0,45}, \rho \approx 0,96$
4	$\Delta p \approx 17,13N^{-0,48}, \rho \approx 1$	$\Delta p \approx 12,95N^{-0,45}, \rho \approx 0,96$	$\Delta p \approx 10,62N^{-0,48}, \rho \approx 0,98$
5	$\Delta p \approx 24,29N^{-0,49}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 19,71N^{-0,49}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 13,59N^{-0,47}, \rho \approx 0,97$
	$r = 5$ км	$r = 15$ км	$r = 25$ км
3	$\Delta p \approx 6,96N^{-0,53}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 9,73N^{-0,53}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 20,48N^{-0,50}, \rho \approx 0,99$
4	$\Delta p \approx 9,40N^{-0,53}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 11,22N^{-0,49}, \rho \approx 0,99$	$\Delta p \approx 27,09N^{-0,50}, \rho \approx 0,99$
5	$\Delta p \approx 12,49N^{-0,54}, \rho \approx 0,85$	$\Delta p \approx 14,00N^{-0,49}, \rho \approx 0,95$	$\Delta p \approx 33,49N^{-0,49}, \rho \approx 0,96$

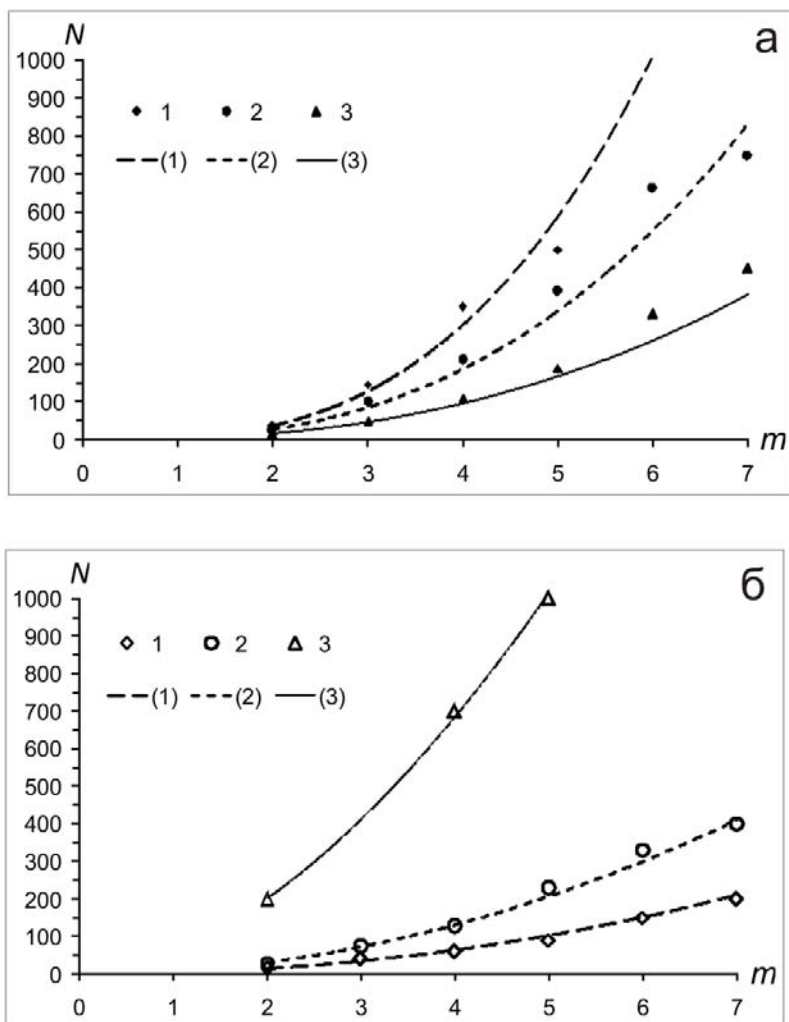


Рис. 3. Графики и тренды чисел событий  $N$  для выделения цепочки из  $m$  событий в угловых секторах  $q = 10, 15$  и  $30^\circ$  (1–3 соответственно) (а) и на расстоянии  $r = 5, 15$  и  $25$  км от линии разлома (1–3 соответственно) (б) при  $\Delta p = 1$

Таблица 2

Уравнения корреляции  $N$  и  $m$  при различных значениях  $q$ ,  $r$  и  $\Delta p$

$\Delta p$	$q = 10^\circ$	$q = 15^\circ$	$q = 30^\circ$
1	$N \approx 4,95m^{2,97}, \rho \approx 0,98$	$N \approx 4,76m^{2,65}, \rho \approx 0,98$	$N \approx 3,21m^{2,46}, \rho \approx 0,97$
2	$N \approx 2,80m^{2,40}, \rho \approx 0,98$	$N \approx 2,55m^{2,28}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 0,99m^{2,46}, \rho \approx 0,98$
3	$N \approx 1,26m^{2,41}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 1,01m^{2,33}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 0,63m^{2,31}, \rho \approx 1$
	$r = 5$ км	$r = 15$ км	$r = 25$ км
1	$N \approx 3,37m^{2,12}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 8,09m^{2,02}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 59,01m^{1,77}, \rho \approx 0,98$
2	$N \approx 0,93m^{2,08}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 1,82m^{2,05}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 10,61m, \rho \approx 0,99$
3	$N \approx 0,54m^{1,94}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 0,83m^{2,04}, \rho \approx 0,99$	$N \approx 5m^2, \rho \approx 1$

Таблица 3

Критерий  $N_{пр}$  при различных значениях  $\Delta p$ ,  $m$ ,  $q$  и  $r$ 

$\Delta p$	$m$	$q$ , градусы			$r$ , км		
		10	15	30	5	15	25
1	3	129	87	48	35	74	413
	4	304	188	97	64	133	686
	5	590	339	168	102	209	1019
2	3	39	31	15	9	17	102
	4	78	60	30	17	31	184
	5	133	100	52	26	49	292
3	3	18	13	8	5	8	45
	4	36	26	15	8	14	80
	5	61	43	26	12	22	125

### Выводы

В рамках базовой модели мигрирующей сейсмичности определены основные критерии выделения цепочек землетрясений. Полученные нами критерии «значимости» и «представительности» позволяют параметризовать процедуру выделения цепочек землетрясений в эпицентральной зоне реальной сейсмичности и в зоне разлома с целью получения однородной информации для сопоставления миграционной активности различных территорий и характеристики современной геодинамики и тектонофизики литосферы, а также поиска предвестника сильного землетрясения. Разработанные методики, реализованные программы и полученные результаты закладывают теоретическую и практическую основу технологии изучения миграции очагов землетрясений в Байкальском регионе.

### Список литературы

- Бот М. О проблеме предсказания землетрясений // Предсказание землетрясений. М. : Мир, 1968. С. 9–20.
- Вилькович Е. В., Губерман Ш. А., Кейлис-Борок В. И. Волны тектонических деформаций на крупных разломах // Докл. АН СССР. 1974. Т. 219, № 1. С. 77–80.
- Касахара К. Механика землетрясений. М. : Мир, 1985. 264 с.
- Ключевский А. В. Напряжения и сейсмичность на современном этапе эволюции литосферы Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2007. № 12. С. 14–26.
- Ключевский А. В., Демьянович В. М., Ключевская А. А. Энергетическая структура сейсмичности юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Докл. Акад. наук. 2015. Т. 464, № 5. С. 611–617.
- Ключевский А. В., Зуев Ф. Л. Структура поля эпицентров землетрясений Байкальского региона // Докл. Акад. наук. 2007. Т. 415, № 5. С. 682–687.
- Ключевский А. В., Какоурова А. А., Демьянович В. М. Цепочки миграций землетрясений в литосфере Байкальского региона // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск, 2017. Вып. 15. С. 122–123.
- Основы физики очага и предвестники землетрясений / В. И. Мячкин, Б. В. Костров, Г. А. Соболев, О. Г. Шамина // Физика очага землетрясения. М., 1975. С. 6–29.
- Проблемы динамики литосферы и сейсмичности / отв. ред. Г. М. Молчан, Б. М. Наймарк, А. Л. Левшин // Вычисл. сейсмология. М. : ГЕОС, 2001. Вып. 32. 303 с.
10. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. М. : Изд-во Ин-та лит., 1963. 670 с.



## The Main Criteria for Allocating Earthquake Chains in the Baikal Region Lithosphere

A. V. Klyuchevskii, A. A. Kakourova

*Institute of the Earth's Crust, Irkutsk*

**Abstract.** Within the framework of the basic model of migratory seismicity, numerical methods have been used to determine the criteria for identifying earthquake chains in epicentral fields of different geometry and the distribution of shocks. The developed model complements the study of migrations of earthquake sources: it allows us to establish the criteria for seismomigration as the excess of the average numbers of chains created by a random spatiotemporal shocks distribution. The seismicity of the Baikal region was used as a prototype of the spatiotemporal and energy distribution of imitation events. When simulating the “area” distribution, simulation events were randomly generated with a constant probability density in round-shaped areas. The “strip” distribution is performed for rectangular areas: along the sites, simulation events were randomly generated with a constant probability density, and across the site – according to the normal law. The criteria of “significance” and “representativeness” presented in the form of graphs and tables make it possible to parametrize the procedure for isolating earthquake migration chains in the epicentral field of seismicity in the region and in the fault zone. In the long term, this makes it possible to obtain homogeneous information for direct comparison of the migration activity of various territories, as characteristics of modern geodynamics and tectonophysics of the lithosphere, and also to search for a precursor of a strong earthquake. The developed methods, implemented programs and the results obtained lay the theoretical and practical basis for the technology of studying the migration of earthquake sources in the Baikal region.

**Keywords:** Baikal region, lithosphere, fault zone, earthquake chains, base model of migrating seismicity, criteria for allocating chains.

**For citation:** Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A. The Main Criteria for Allocating Earthquake Chains in the Baikal Region Lithosphere. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2018, vol. 23, pp. 64-73. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.23.64>. (in Russian)

### References

- Bot M. O probleme predskazaniya zemletryasenii [On the Problem of Earthquakes Prediction]. *Predskazanie zemletryasenii* [The prediction of earthquakes]. Moscow, Mir Publ., 1968, pp. 9-20 (in Russian)
- Vilkovich E.V., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I. Volny tektonicheskikh deformatsii na krupnykh razlomakh [Waves of tectonic deformations on large faults]. *Dokl. AN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1974, vol. 219 (1), pp. 77-80. (in Russian)
- Kasakhara K. *Mekhanika zemletryasenii* [Earthquake Mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1985. 264 p. (in Russian)
- Klyuchevskii A.V. Napryazheniya i seismichnost na sovremennom etape evolyutsii litosfery Baikalskoi riftovoi zony [Stresses and Seismicity at the Present Stage of Evolution of the Baikal Rift Zone Lithosphere]. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth], 2007, no. 12, pp. 14-26. (in Russian)
- Klyuchevskii A.V. Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A. Energeticheskaya struktura seismichnosti yugo-zapadnogo flanga Baikalskoi riftovoi zony [Energy Structure Of Seismicity At The Southwestern Flank Of The Baikal Rift System]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2015, vol. 464, no. 5, pp. 611-617. (in Russian)
- Klyuchevskii F.L., Zuev F.L. Struktura polya epitsentrov zemletryasenii Baikalskogo regiona [Structure of the Epicenter Field of Earthquakes in the Baikal Region]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 2007, vol. 415, no. 5, pp. 682-687. (in Russian)

Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A., Dem'yanovich V.M. Tsepochki migratsii zemletryaseni v litosfere Baikalskogo regiona [Migration's Chains of Earthquakes in the Lithosphere of the Baikal Region]. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)*. [Geodynamic Evolution of Lithosphere of Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)]. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2017, vol. 15, pp. 122-123. (in Russian)

Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Osnovy fiziki ochaga i predvestniki zemletryaseni [The Basics of Source Physics and Earthquake Precursors]. *Fizika ochaga zemletryaseniya* [Physics of Earthquake Source]. Moscow, Nauka Publ., 1975, pp. 6-29. (in Russian)

Molchan G.M., Naimark B.M., Levshin A.L. (eds.) Problems of dynamics of lithosphere and seismicity. *Vychislitel'naya seismologiya* [Computational Seismology]. Moscow, GEOS Publ., 2001, vol. 32, 303 p. (in Russian).

Rihter Ch. *Elementarnaya seismologiya* [Elementary Seismology]. Moscow, Institute of Literature Publ., 1963, 670 p. (in Russian).

*Ключевский Анатолий Васильевич*  
доктор геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник, главный  
научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
Россия, 664033, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952)42-70-00  
e-mail: akluchev@crust.irk.ru

*Klyuchevskii Anatolii Vasilyevich*  
Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy),  
Senior Researcher, Chief Researcher  
Institute of the Earth's Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
tel.: (3952)42-70-00  
e-mail: akluchev@crust.irk.ru

*Какоурова Анна Александровна*  
аспирант  
Институт земной коры СО РАН  
Россия, 664033, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952)42-70-00  
e-mail: anna2015@crust.irk.ru

*Kakourova Anna Aleksandrovna*  
Postgraduate  
Institute of the Earth's Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
tel.: (3952)42-70-00  
e-mail: anna2015@crust.irk.ru