

УДК 550.34.06 + 550.343.2 + 551.243

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРИРУЮЩЕЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЛИТОСФЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

А. В. Ключевский*, А. А. Какоурова

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 18.02.2019 г.

Поступило 06.03.2019 г.

По данным “Каталога землетрясений Прибайкалья” (52 700 толчков с представительным энергетическим классом $K_p \geq 8$, 1964–2013 гг.) при угловом секторе азимутального анализа $q=10^\circ$ ($\pm 5^\circ$ от азимута α) определены и выделены $M=2143$ квазилинейные цепочки землетрясений. Установлены основные закономерности пространственно-временного и энергетического распределения цепочек землетрясений в литосфере Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Максимальное количество цепочек выделено среди слабых толчков, с ростом K_p число цепочек уменьшается по закону повторяемости $\lg M = f(K_p)$ с наклоном $-0,48$. Азимуты цепочек землетрясений (50° – 60° и 240° – 260°) соответствуют простиранию основных сейсмогенных разломов и эпицентрального поля сейсмичности БРЗ. В пространственно-временном распределении цепочек наблюдаются максимумы, коррелирующие с повышенной плотностью эпицентров и скоростью потока землетрясений. С целью исследования мигрирующей сейсмичности использован индекс сейсмомиграционной активности, характеризующий на заданном уровне значимости соотношение сейсмомиграции/псевдомиграции, получены карты распределения индекса по территории и графики изменений по годам. Результаты исследования указывают на непосредственную связь мигрирующей сейсмичности БРЗ с расположением и активизациями структур-аттракторов рифтогенеза.

Ключевые слова: сейсмичность, Байкальская рифтовая зона, цепочки землетрясений, сейсмомиграции, современная геодинамика литосферы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652488313-318>

Исследование мигрирующей сейсмичности выполнено по данным о 52 700 землетрясениях представительных энергетических классов $K_p \geq 8$, произошедших в литосфере Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) с 1964 по 2013 гг. Выделены $M=2143$ квазилинейные цепочки землетрясений и установлены основные закономерности пространственно-временного и энергетического распределения. В эпицентральной области сейсмичности БРЗ имеются цепочки “сейсмомиграции” и цепочки, сформировавшиеся случайно (“псевдомиграции”). Для выявления мигрирующей сейсмичности использован индекс сейсмомиграционной активности (ИСМА), характеризующий на заданном уровне значимости соотношение сейсмомиграции/псевдомиграции, получены карты распределения индекса по территории и графики изменений по годам. Результаты исследования указывают на непосредственную связь мигрирующей сейсмичности БРЗ с расположением и активизациями структур-аттракторов рифтогенеза (САР).

Современная компьютеризация позволяет обрабатывать большие объёмы сейсмологических материалов с целью получения новых знаний о природе

и свойствах сейсмичности. Эти знания используются для анализа и сопоставления пространственно-временной и энергетической структуры сейсмичности регионов, а также поиска предвестников сильных землетрясений. При решении этих задач многомерное пространство параметров землетрясений диагностируется путём совместного анализа моделей, феноменологии и экспериментальных данных с использованием процедур и понятий скейлинга, самоподобия, пространственно-временной корреляции, откликов на возбуждение, предсказуемости на различных масштабах и “миграции” очагов землетрясений [1]. Явление “миграции” очагов землетрясений стало широко известно после публикации Ч.Ф. Рихтера [2], в которой описано поступательное смещение эпицентров сильных землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома в Турции. Цепочки сильных землетрясений выявлены во многих сейсмоактивных регионах и феноменологически рассматриваются как “миграции” очагов землетрясений. В рамках этого явления сведения о цепочках сильных толчков стали использоваться для прогноза землетрясений и анализа сейсмогеодинамики литосферы [3, 4]. Под цепочкой землетрясений понимается квазилинейное одностороннее изменение положения эпицентров толчков на поверхности литосферы. Следуя этой аналогии, в данной работе цепочками считаются совокупности из $n \geq 3$ после-

Институт земной коры Сибирского отделения
Российской Академии наук, Иркутск

*akluchev@crust.irk.ru

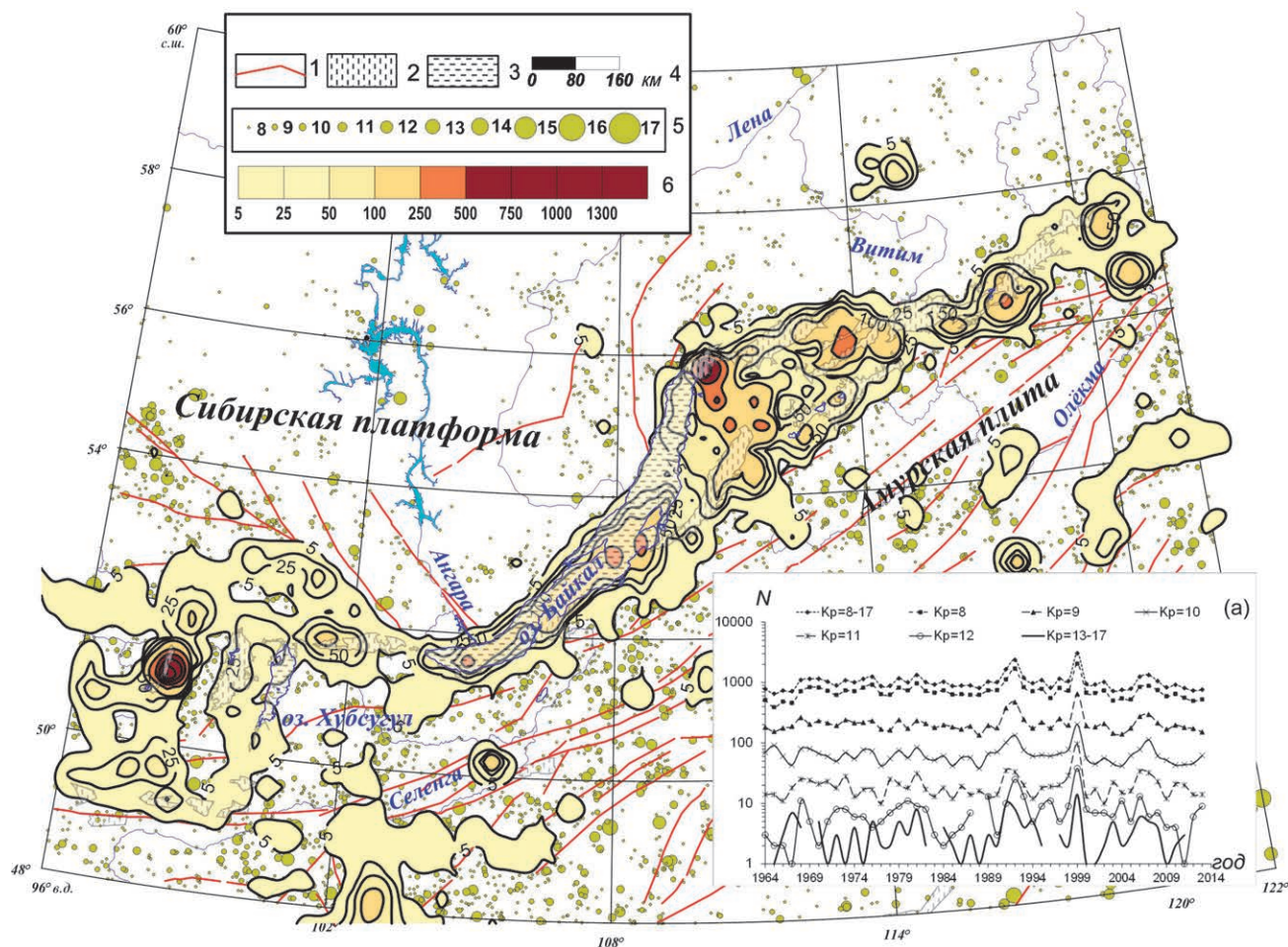


Рис. 1. Карта эпицентров и изолиний плотности эпицентров в площадках $0,2^\circ \times 0,3^\circ$, построенная для 52 700 землетрясений Байкальского региона с $K_p \geq 8$ (1964–2013 гг.). 1 – основные разломы, 2 – впадины, 3 – озёра, 4 – масштабная линейка, 5 – эпицентры представительных землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 8$, 6 – шкала изолиний плотности эпицентров. На вставке (а) приведены графики годовых чисел N землетрясений полной выборки данных с $K_p \geq 8$ и выборки толчков отдельных классов ($K_p = 8, K_p = 9, \dots, K_p = 12, K_p = 13-17$).

довательных во времени (друг за другом) землетрясений при условии нахождения толчков в заданном угловом секторе допустимой нелинейности цепочки q по азимуту миграции α [5]. По результатам выделения цепочек землетрясений выполнен анализ их распределения в пространстве, времени и по энергии с целью изучения мигрирующей сейсмичности в литосфере БРЗ.

В работе использованы данные о 52 700 землетрясениях представительных энергетических классов $K_p \geq 8$, зарегистрированных на территории Байкальского региона ($\varphi = 48^\circ - 60^\circ$ с.ш., $\lambda = 96^\circ - 122^\circ$ в.д.) с 1964 по 2013 гг. На карте эпицентров и изолиний плотности эпицентров землетрясений в площадках $0,2^\circ \times 0,3^\circ$ видно (рис. 1), что сейсмические события концентрируются в виде полос преимущественно северо-восток-юго-западной ориентировки, соответствующей простиранию основных сейсмогенных разломов БРЗ. Сопредельные территории суще-

ственно отличаются по сейсмичности: на карте отчетливо выделяется контур высокосейсмичной БРЗ, ограниченный почти асейсмичной Сибирской платформой и слабосейсмичным Забайкальем. На вставке (рис. 1а) приведены графики годовых чисел N землетрясений с $K_p \geq 8$ и выборки толчков отдельных классов ($K_p = 8, K_p = 9, \dots, K_p = 12, K_p = 13-17$). Основные максимумы годовых чисел толчков выделяются в 1992 и 1999 годах и обусловлены афтершоками Бусийнгольского (27.12.1991 г.; $K_p = 16,2$; $\varphi = 50,98^\circ$ с.ш., $\lambda = 98,08^\circ$ в.д.), Южно-Байкальского (25.02.1999 г.; $K_p = 14,6$; $\varphi = 51,64^\circ$ с.ш., $\lambda = 104,82^\circ$ в.д.) и Кичерского (21.03.1999; $K_p = 14,5$; $\varphi = 55,83^\circ$ с.ш., $\lambda = 110,34^\circ$ в.д.) землетрясений. График повторяемости землетрясений региона имеет наклон $g \approx -0,50$ [6, 7].

На рис. 2 приведена карта-схема 2143 цепочек землетрясений, определённых и выделенных в эпицентральной поле сейсмичности БРЗ при угловом

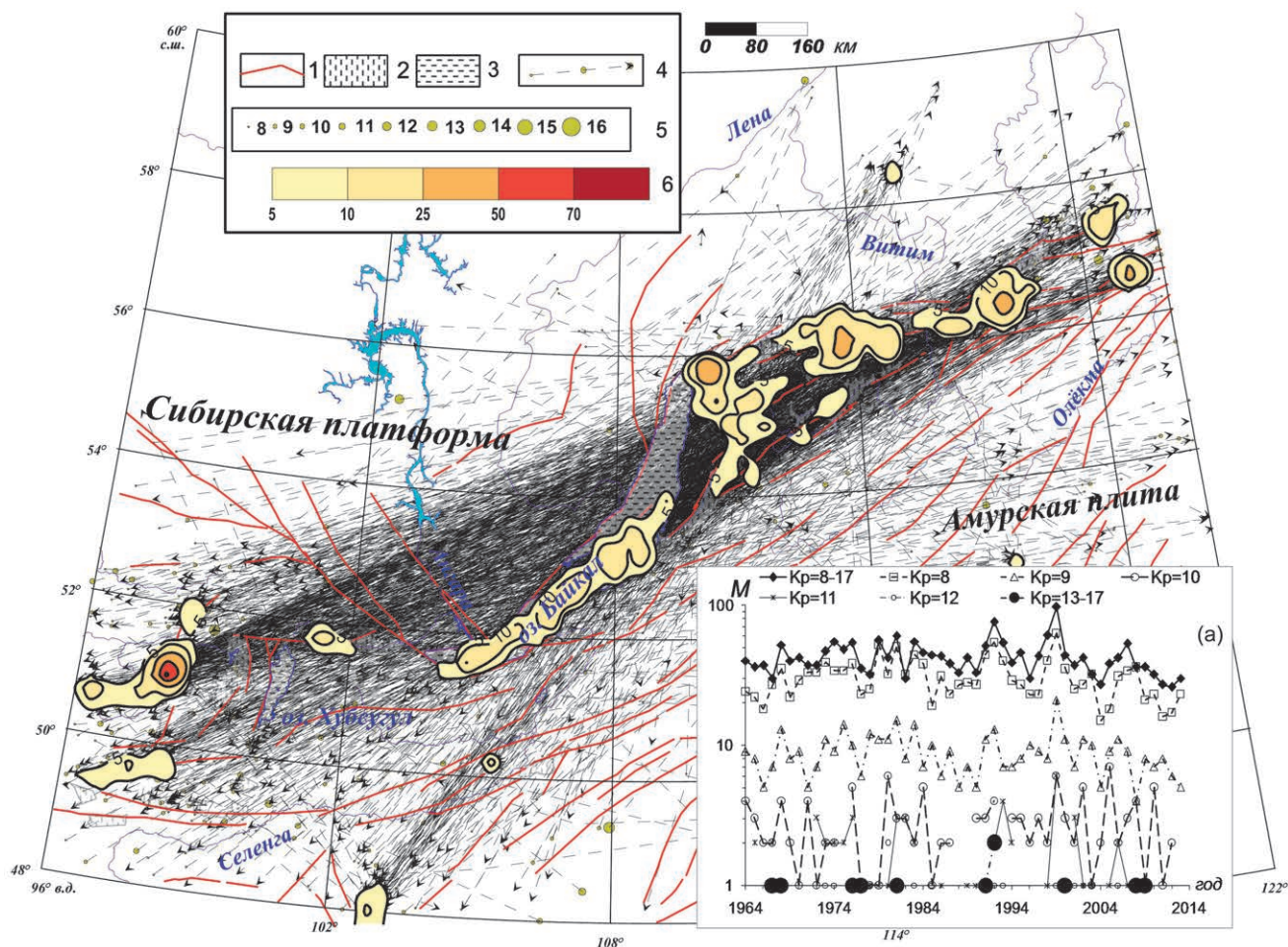


Рис. 2. Карта-схема расположения 2143 цепочек землетрясений, определенных и выделенных при угловом секторе азимутального анализа $q = 10^\circ$. 1 – основные разломы, 2 – впадины, 3 – озёра, 4 – “векторы” миграций, 5 – первые в цепочке эпицентры землетрясений, 6 – шкала изолиний плотности эпицентров первых землетрясений цепочек. На вставке (а) представлены графики годовых чисел цепочек землетрясений M , определенных и выделенных из выборки толчков с $K_p \geq 8$ и из выборки толчков отдельных классов ($K_p = 8, K_p = 9, \dots, K_p = 12, K_p = 13 \div 17$).

секторе азимутального анализа $q = 10^\circ$ ($\pm 5^\circ$ от азимута миграции α). На карте-схеме цепочки представлены в виде “векторов” от эпицентра первого к эпицентру последнего толчка цепочки. По координатам эпицентров первых толчков в цепочках (начала цепочек) посчитаны плотности эпицентров в площадках $0,2^\circ \times 0,3^\circ$ и проведены изолинии плотности цепочек. На рис. 2 видно, что повышенная плотность и азимуты “векторов” хорошо коррелируются с расположением и северо-восток-юго-западной ориентировкой зон основных сейсмогенных разломов, а максимумы плотности цепочек обычно совпадают с зонами высокой плотности эпицентров толчков на рис. 1. На вставке (рис. 2а) представлены графики годовых чисел цепочек землетрясений M . Видно, что максимальное число цепочек формируется слабыми толчками с $K_p = 8-9$, с ростом K_p количество цепочек уменьшается. Основные максимумы M выделяются в 1992 и 1999 годах

и соответствуют максимумам чисел землетрясений N на рис. 1а. Распределения логарифма чисел цепочек землетрясений по энергетическим классам $\lg M = f(K_p)$ имеет наклон $-0,48$ и в пределах стандартного отклонения соответствует наклону графика повторяемости землетрясений. Известно [8, с. 139], что подобные степенные законы описывают статистические распределения широкого спектра природных явлений и “...формируют семейное дерево, для которого закон Гутенберга–Рихтера является одной из ветвей”.

На рис. 3 представлена карта-схема изолиний плотности цепочек в площадках $100 \times 100 \text{ км}^2$. Видно, что в пределах БРЗ формируется единая зона повышенной плотности цепочек ($M \geq 5$), в некоторых площадках выделено более 100 цепочек, а максимум свыше 120 цепочек наблюдается в районе афтершоков Кичерского землетрясения 1999 года; за преде-

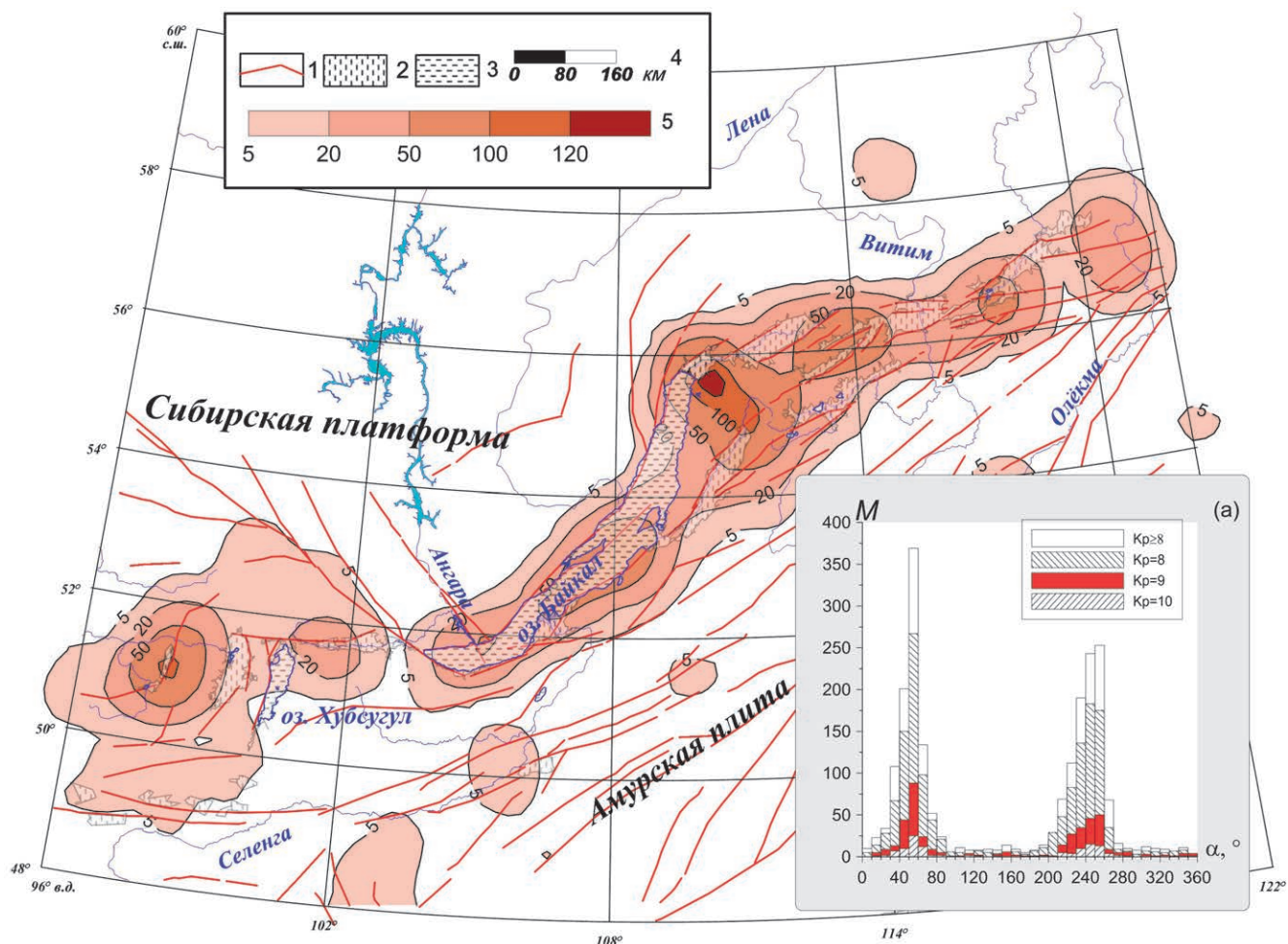


Рис. 3. Карта-схема изолиний плотности цепочек в площадках $100 \times 100 \text{ км}^2$. 1 – основные разломы, 2 – впадины, 3 – озёра, 4 – масштабная линейка, 5 – шкала изолиний плотности цепочек. На вставке (а) приведены гистограммы распределения чисел цепочек M по азимуту α для полной выборки данных с $K_p \geq 8$ и выборки толчков отдельных классов ($K_p = 8, K_p = 9, K_p = 10$).

лами БРЗ цепочки землетрясений фактически отсутствуют. Карта-схема плотности цепочек землетрясений хорошо соответствует карте плотности эпицентров толчков (см. рис. 1). На рис. 3а представлены гистограммы распределения чисел цепочек M по азимуту α . Видно, что распределения имеют нормальный вид с максимумами в азимутах $50^\circ - 60^\circ$ и $240^\circ - 260^\circ$ согласно с ориентацией разломов и поля эпицентров землетрясений БРЗ.

Мы полагаем, что некоторые из выделенных цепочек землетрясений не являются миграциям очагов землетрясений (сейсмомиграциями), а создаются в результате случайной пространственно-временной комбинации толчков (“псевдомиграции”). Доказательством служит выдержанная пропорциональность соотношений между числом землетрясений и числом цепочек в их пространственно-временных и энергетических распределениях, а также выделение цепочек среди имитационных событий со случайным

распределением [9]. Оценки показывают, что в зоне разлома при двух возможных направлениях миграции вероятность выделения цепочки из трёх последовательных во времени случайных толчков достаточно высока ($P = 1/2 \cdot 1/2 = 1/4$). Поэтому для изучения мигрирующей сейсмичности БРЗ нами используется “индекс сейсмомиграционной активности” (ИСМА), равный отношению числа цепочек землетрясений M , выделенных среди N землетрясений изучаемой территории к среднему числу цепочек имитационных событий \bar{M} , выделенных при таких же условиях в поле случайных событий: $\text{ИСМА} = M / (\bar{M} + i\sigma)$. Если $\text{ИСМА} > 1$, то в литосфере исследуемой территории присутствуют сейсмомиграции на уровне значимости $i\sigma$ ($i = 1, 2, 3$).

На рис. 4 карта-схема изолиний критерия ИСМА в площадках $100 \times 100 \text{ км}^2$ представлена на уровне значимости в одно стандартное отклонение σ .

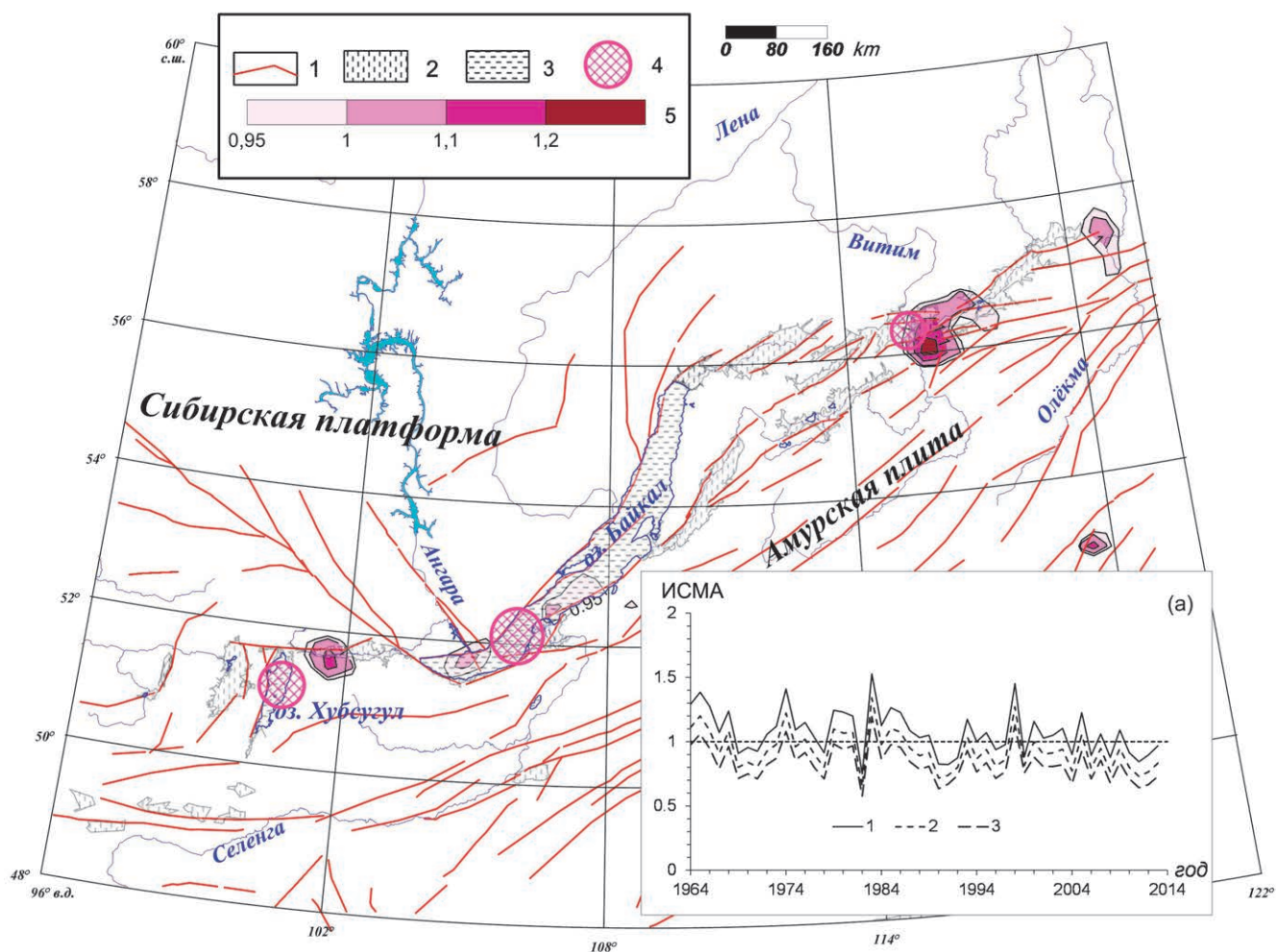


Рис. 4. Карта-схема изолиний критерия ИСМА на уровне значимости в одно стандартное отклонение в площадках $100 \times 100 \text{ км}^2$. 1 – основные разломы, 2 – впадины, 3 – озёра, 4 – структуры-аттракторы рифтогенеза (из [11]), 5 – шкала изолиний ИСМА. На вставке (а) представлены графики (1, 2, 3) изменения ИСМА по годам на уровне значимости в 1, 2, 3 стандартное отклонение соответственно. Уровень ИСМА=1 показан пунктирной линией.

Видно, что в пределах БРЗ имеются несколько отдельных зон, удовлетворяющих условию ИСМА > 1. Обращает на себя внимание приуроченность наиболее значительных зон ИСМА > 1 к САР [10, 11] и особенности их расположения: на флангах зоны расположены к востоку от САР, а в центральной части БРЗ – по обе стороны от САР. Такой характер распределения ИСМА указывает, что САР являются источниками региональных деформационных возмущений, проявившихся в цепочках сейсмомиграций. На крайнем северо-востоке БРЗ в районе р. Олёкма имеется зона повышенного ИСМА: она описана ранее как область, формирующая развитие БРЗ на восток [12]. За пределами БРЗ имеется одна зона высоких значений ИСМА в восточной части карты, возможно, что в этой зоне цепочки формируются при разнесенных промышленных взрывах [13]. На уровне значимости в два стандартных отклонения на карте ИСМА остаются три зоны к

востоку от трёх САР, а на уровне в три стандарта наблюдается только одна зона к востоку от Северо-Муйской САР. На вставке (рис. 4а) представлены графики изменения ИСМА по годам: имеются четыре интервала времени, в которых сейсмомиграции присутствуют на трёх уровнях значимости – это максимумы 1965, 1974, 1983 и 1998 годов. Максимумы ИСМА на рис. 4а формируются через 3–4 года после начала активизаций САР; максимумы ИСМА и максимумы M на рис. 2а (1992, 1999 годы) не совпадают во времени.

Переходные релаксационные процессы в геолого-геофизической среде находят отражение в “миграциях” очагов землетрясений, и одной из основных задач статистического исследования сейсмичности является изучение этих процессов в проявлениях мигрирующей сейсмичности. Для решения этой задачи необходимо дальнейшее развитие и совершенствование методики определения и выделения ква-

зилинейных цепочек землетрясений, являющихся атрибутом и свойством мигрирующей сейсмичности. В отличие от единичных сейсмических событий, отражающих в целом стохастичность дискретной сейсмичности, цепочки землетрясений являются важным геоинформационным репером в пространственно-временном распределении землетрясений. Они могут быть с высокой степенью достоверности выделены на заданном уровне значимости и проинтерпретированы как статистические ансамбли. Этот другой уровень организации сейсмичности, как и сильные землетрясения, характеризует строения геосреды и системные свойства сейсмогенеза и современной геодинамики в обобщённом виде. Цепочки землетрясений, как свойство мигрирующей сейсмичности, будут играть важную роль при изучении напряжённо-деформированного состояния среды в очаговой зоне сильного землетрясения и в зонах разломов и могут быть использованы для целей средне- и краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

Источник финансирования. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 14-05-00308_a).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ геодинамических и сейсмических процессов В сб.: Вычислительная сейсмология / Под ред. В.И. Кейлис-Борока, Г.М. Молчана. М.: Геос, 2004. Вып. 35. 329 с.
2. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.
3. Бот М.О проблеме предсказания землетрясений. В кн.: Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1968. С. 9–20.
4. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
5. Ключевский А.В., Какоурова А.А., Ключевская А.А., Демьянович В.М., Черных Е.Н. Пат. RU 2659334 С1. (Способ определения цепочек землетрясений в эпицентральной поле сейсмичности). М., 2018.
6. Ключевский А.В. // ДАН. 2005. Т. 403. № 1. С. 96–100.
7. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. // ДАН. 2015. Т. 464. № 5. С. 611–617.
8. Голицын Г.С. Вычислительная сейсмология. М.: Геос. 2001. В. 32. С. 139–161.
9. Ключевский А.В., Какоурова А.А. Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2018. Т. 23. С. 64–73.
10. Ключевский А.В. // ДАН. 2011. Т. 437. № 2. С. 249–253.
11. Klyuchevskii A.V. // J. Asian Earth Sciences. 2014. V. 88. P. 246–256.
12. Ключевский А.В., Демьянович В.М. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 65–78.
13. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А., Зувев Ф.Л., Какоурова А.А., Черных Е.Н., Брыжак Е.В. Группирующаяся сейсмичность Прибайкалья. В сб.: Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. С. 139–143.

INVESTIGATION OF MIGRATORY SEISMICITY IN THE LITHOSPHERE OF THE BAIKAL RIFT ZONE

A.V. Klyuchevskii, A.A. Kakourova

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

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn February 18, 2019

Received March 6, 2019

The study of migrating seismicity was carried out according to data on 52700 earthquakes of representative energy classes $K_p \geq 8$, which occurred in the lithosphere of the Baikal Rift Zone (BRZ) from 1964 to 2013. $M=2143$ quasilinear chains of earthquakes are distinguished and the basic laws of the space-time and energy distribution are established. In the epicentral field of the BRZ seismicity, there are chains of “seismic migration” and chains formed by chance (“pseudo-migration”). To identify the migrating seismicity, the seismic migration activity index (ISMA) was used, which characterizes the seismic migration / pseudo-migration ratio at a given level of significance, obtained maps of the distribution of the index over the territory and graphs of changes over years. The results of the study indicate a direct link between the migrating BRZ seismicity and the location and activation of rifting attractor structures (RAS).

Keywords: seismicity, Baikal rift zone, earthquake chains, seismic migration, current geodynamics of the lithosphere.