

Геоинформатика. 2025. № 1. С. 22–34.
Geoinformatika. 2025;(1):22–34.

Моделирование геобъектов и геопроцессов

Научная статья
 УДК 550.34.042(4+43)
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-22-34>

Эпизоды высокой корреляции годовых чисел и наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона

© 2025 г. — А.А. Какоурова^{а)}, В.М. Демьянович, А.А. Ключевская, В.И. Джурик, Е.В. Брыжак

ФГБУН Институт земной коры СО РАН; Иркутск, Россия

^{а)}anna2015@crust.irk.ru

Аннотация: В настоящее время актуальными задачами являются изучение геолого-геофизических процессов, происходящих в литосфере Земли, и прогноз сильных землетрясений. Для возможности решения этих задач необходимы мониторинг и изучение закономерностей сейсмического процесса. В настоящей статье с использованием статистического подхода приведены результаты исследований корреляции годовых чисел и наклонов графиков повторяемости представительных землетрясений Байкальского региона и различных иерархических уровней Байкальской рифтовой системы — трех районов и шести участков, произошедших в 1968–2014 гг. Исследование проведено при длинах реализации 3, 5 и 10 лет с шагом в 1 год. Выявлены эпизоды высокой корреляции данных параметров в Байкальском регионе и районах Байкальской рифтовой системы, а также в Байкальском регионе и участках Байкальской рифтовой системы. Эти эпизоды представляют собой периоды синхронизации сейсмического процесса указанных территорий. В конце 1970-х – начале 1980-х гг. высокие корреляции обоих параметров наблюдаются одновременно и совпадают по времени с активизацией структур-аттракторов рифтогенеза в Байкальской рифтовой системе. Активизация структур-аттракторов рифтогенеза также может быть причиной высоких корреляций параметров в конце 1990-х – начале 2000-х гг. и, возможно, в конце 2000-х гг. Авторы статьи полагают, что активизации структур-аттракторов рифтогенеза могут способствовать синхронизациям параметров сейсмического режима территорий на разных иерархических уровнях. Полученные результаты также могут свидетельствовать о прохождении деформационных волн, генерируемых в областях структур-аттракторов рифтогенеза или в зонах разломов. Дальнейшее изучение синхронизаций сейсмического процесса в Байкальском регионе будет способствовать решению задачи поиска доказательств существования деформационных волн в литосфере региона.

Ключевые слова: *Байкальская рифтовая система; землетрясения; наклон графика повторяемости землетрясений; сейсмичность; сейсмический процесс; числа землетрясений.*

Для цитирования: Какоурова А.А., Демьянович В.М., Ключевская А.А., Джурик В.И., Брыжак Е.В. Эпизоды высокой корреляции годовых чисел и наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона // Геоинформатика. — 2025. — № 1. — С. 22–34. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-22-34>.

Modeling of geological objects and geoprocesses

Original article

Episodes of high correlation of the annual numbers of earthquakes and the slopes of the earthquake recurrence graphs of the Baikal Region

© 2025 — А.А. Kakourova^{а)}, V.M. Dem'yanovich, A.A. Klyuchevskaya, V.I. Dzhurik, E.V. Bryzhak

The Institute of Earth's Crust SB RAS; Irkutsk, Russia

^{а)}anna2015@crust.irk.ru

Abstract: Currently, the topical issues are the study of geological and geophysical processes occurring in the Earth's lithosphere and the forecast of strong earthquakes. To be able to solve these problems, it is necessary to monitor and study the patterns of the seismic process. In this paper, using a statistical approach, we study the correlations of annual numbers and slopes of the recurrence graphs of representative earthquakes in the Baikal region and various hierarchical levels of the Baikal Rift System (BRS) - three districts and six sections- that occurred in 1968-2014. The study was carried out for implementation lengths of three, five and ten years with a step of one year. Episodes of high correlation of these parameters in the Baikal region and BRS areas, as well as the Baikal region and BRS sections, were revealed, representing episodes of synchronization of the seismic process in these territories. In the late 1970s- early 1980s. High correlations of both parameters are observed simultaneously and coincide in time with the activation of rifting attractor structures (RAS) in the BRS. RAS activation may also be the reason for high correlations of parameters in the late 1990s- early 2000s and, possibly, in the late 2000s. We believe that RAS activations may contribute to synchronization of seismic regime parameters of the BRS territories at different hierarchical levels. The obtained results may also indicate the passage of deformation waves generated in the RAS areas or fault zones. Further study of synchronizations of the seismic process in the Baikal region will contribute to solving the problem of searching for evidence of the existence of deformation waves in the lithosphere of the region.

Key words: *Baikal rift system; earthquakes; slope of earthquake recurrence graph; seismicity, seismic process; number of earthquakes.*

For citation: *Kakourova A.A., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A., Dzhurik V.I., Bryzhak E.V. Episodes of high correlation of the annual numbers of earthquakes and the slopes of the earthquake recurrence graphs of the Baikal Region. *Geoinformatika*. 2025;(1):22–34. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-22-34>. In Russ.*

Введение

В настоящее время активно изучаются причины землетрясений, которые могут быть рассмотрены как предвестники сильных сейсмических событий и применимы для решения чрезвычайно важной задачи прогноза землетрясений, способных привести к человеческим жертвам и значительному экономическому ущербу [1]. Мониторинг и поиск закономерностей сейсмического процесса является важными для изучения геолого-геофизических процессов, происходящих в литосфере Земли, и прогноза сильных землетрясений. Так, в соответствии с моделью сейсмического затишья, увеличение средней скорости потока землетрясений на большой территории вокруг будущего сильного толчка [2] происходит при уменьшении скорости потока толчков в пределах очаговой зоны этого землетрясения [3, 4].

При изучении энергетической структуры сейсмичности и оценке средней повторяемости сильных землетрясений получили применение графики повторяемости землетрясений [5–9]. Определение параметров графиков повторяемости землетрясений возможно за счет классификации землетрясений по шкале магнитуд или энергетических классов. В различных работах выявлены статистически значимые различия наклонов графиков повторяемости землетрясений не только по данным о толчках в разных сейсмоактивных районах Земли, но и для различных специфических тектонических режимов, таких как зоны субдукции литосферных плит [10], а также в зонах афтершоков сильнейших сейсмических событий [11].

Сейсмологические наблюдения и лабораторные эксперименты свидетельствуют о том, что пространственно-временные вариации сейсмичности, предшествующие и сопутствующие геодинамическим перестройкам и сильным землетрясениям, являются одним из наиболее характерных геофизических явлений [12]. Такие процессы могут ассоциироваться с приближением к критическому значению некоторого «управляющего параметра», характеризующего эволюцию напряженно-деформированного состояния среды. Приближение к критическому значению приводит нагружаемый объект в неустойчивое состояние, которое может закончиться разрывом соответствующей длины и переходом среды в состояние релаксации [13]. Согласно указанной работе, с приближением к критическому значению увеличивается корреляционное расстояние, на котором можно наблюдать сопутствующие предвестниковые и когерентные явления. Примером могут служить разнесенные в пространстве парные сильные землетрясения [14–16], происхождение которых может быть связано с ростом корреляционных расстояний.

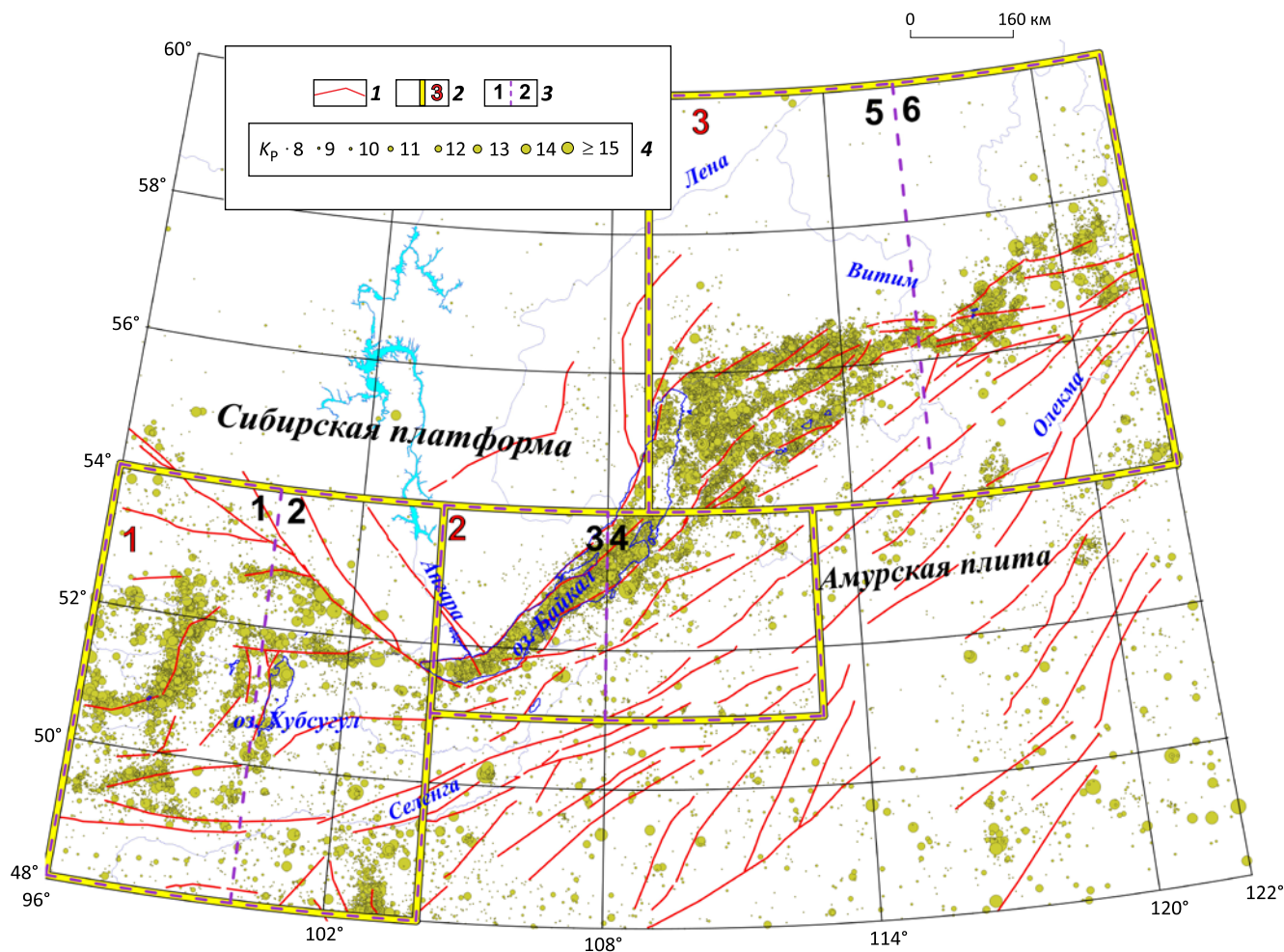
Корреляции чисел землетрясений ранее рассматривались в работах А.В. Ключевского. Так, в работе [13] выделены эпизоды высокой корреляции чисел землетрясений в литосфере Байкальской рифтовой системы (БРС) в конце 1960-х и конце 1970-х – начале 1980-х гг., что указывает на синхронизацию сейсмического процесса. В настоящей статье проведены результаты исследований корреляции годовых чисел землетрясений (скорости потока толчков) и наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона, трех районов и шести участков БРС. Эти территории рассматриваются как различные иерархические уровни литосферы региона [17]. За счет использования выборок разной длины и разделения БРС на районы и участки появляется возможность установить периоды времени, в которые наблюдалась высокая корреляция изучаемых параметров сейсмического процесса.

Материалы и методика исследований

Исходные данные о землетрясениях представительного энергетического класса $K_p \geq 8$ [18], зарегистрированных на территории Байкальского региона в 1968–2014 гг. ($\varphi = 48\text{--}60^\circ$ с.ш., $\lambda = 96\text{--}122^\circ$ в.д.), взяты из «Каталога землетрясений Прибайкалья», составленного специалистами групп сводной обработки Байкальского [19] и Алтае-Саянского [20] филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук». На карте эпицентров этих землетрясений, приведенной на рис. 1, видно, что эпицентры концентрируются преимущественно в пределах БРС в виде полос в основном субширотной и северо-восточной ориентаций. Окружающие БРС территории отличаются от нее по сейсмичности: помимо высокосейсмичной БРС на карте эпицентров землетрясений выделяются слабосейсмичное Забайкалье и почти асейсмичная Сибирская платформа. Для изучения параметров сейсмического процесса Байкальского региона на различных иерархических уровнях БРС разделена на три района с различным характером распределения эпицентров землетрясений: на юго-западный (район 1, $\varphi = 48\text{--}54^\circ$ с.ш., $\lambda = 96,0\text{--}104^\circ$ в.д.) и северо-восточный (район 3, $\varphi = 54\text{--}60^\circ$ с.ш., $\lambda = 109\text{--}122^\circ$ в.д.) фланги и центральную часть (район 2, $\varphi = 51\text{--}54^\circ$ с.ш., $\lambda = 104\text{--}113^\circ$ в.д.). Участки получены делением районов по долготе $\lambda = 100^\circ$, $\lambda = 108^\circ$ и $\lambda = 116^\circ$ в.д. [23]. Исследования распределения эпицентров землетрясений показали, что по территории юго-западного фланга землетрясения рассеяны, а на территории северо-восточного фланга и центральной части БРС эпицентральной поле имеет вид изогнутой полосы, расположенной в области контакта Сибирского кратона и Амурской плиты (см. рис. 1).

Рис. 1. Карта эпицентров 50 432 землетрясений энергетического класса $K_p \geq 8$, зарегистрированных на территории Байкальского региона в 1968–2014 гг.

Fig. 1. Map of the epicenters of 50 432 earthquakes of energy class $K_p \geq 8$, registered in the Baikal region in 1968–2014



1 — разломы; **2** — границы и номера районов; **3** — границы и номера участков; **4** — эпицентры землетрясений различных энергетических классов

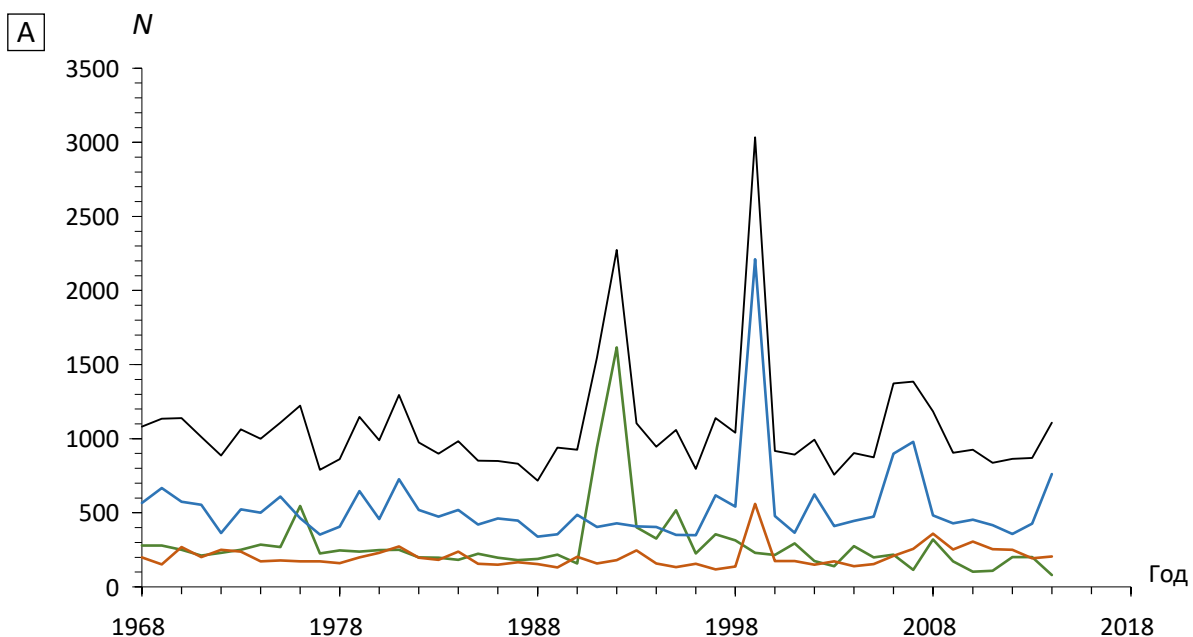
1 — faults; *2* — boundaries and numbers of regions; *3* — boundaries and numbers of sections lakes; *4* — epicenters of earthquakes of various energy classes

Для выбранных землетрясений Байкальского региона, трех районов и шести участков БРС рассчитаны годовые числа землетрясений N и годовые значения наклонов графиков повторяемости землетрясений γ . Поскольку при классификации сейсмических событий Байкальского региона применяется шкала энергетических классов K_p Т.Г. Раутиан [22], наклоны графиков повторяемости землетрясений рассчитаны с применением энергетических классов толчков. Графики полученных значений представлены на рис. 2 и 3, из которых видно, что значения параметров варьируют в разные годы, графики имеют колебательный характер. Как следует из рис. 2 А, В, максимум годовых чисел землетрясений наблюдается в Байкальском регионе в 1999 г. ($N=3034$). Этот максимум обусловлен

группами Южнобайкальского (25.02.1999; $K_p = 14,6$, $M_w = 6,0$; $\varphi = 51,64^\circ$ с.ш., $\lambda = 104,82^\circ$ в.д.) и Кичерского землетрясений, (21.03.1999; $K_p = 14,5$, $M_w = 5,7$; $\varphi = 55,83^\circ$ с.ш., $\lambda = 110,34^\circ$ в.д.). Минимальное число землетрясений зарегистрировано в 2014 г. в первом участке БРС. Максимум годовых значений наклонов графиков повторяемости землетрясений $\gamma = -0,21$ наблюдается в 2014 г. в первом участке, а минимум данного параметра $\gamma = -0,88$, согласно рис. 3 А, В, отмечен в 1979 г. во втором участке и в 1983 г. в четвертом участке.

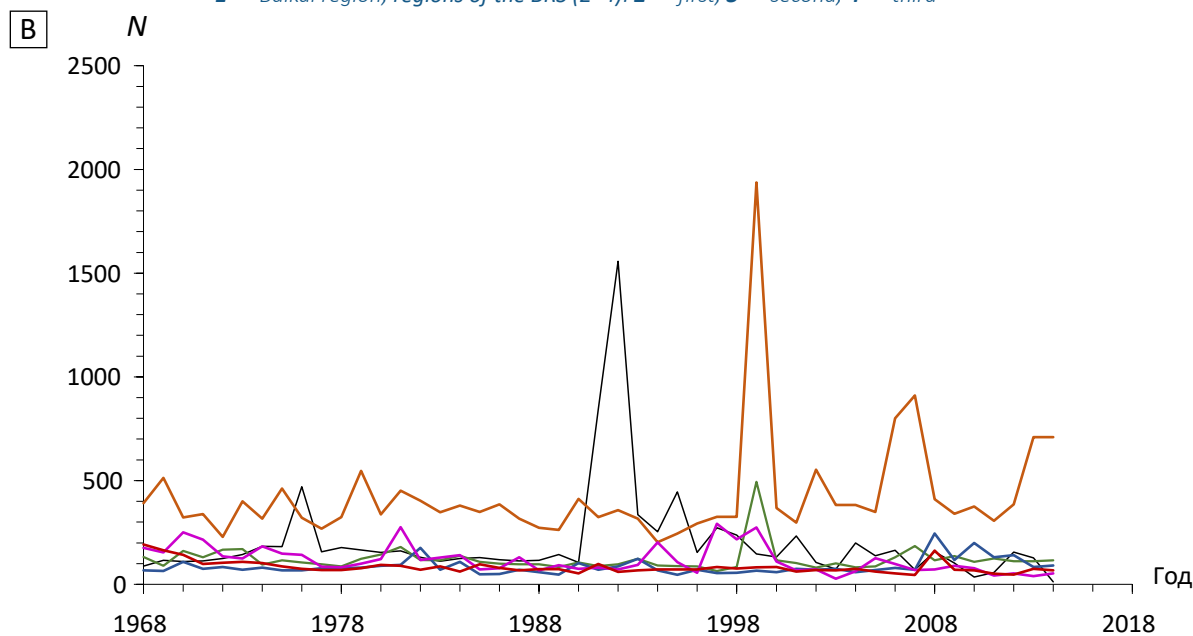
Одним из распространенных методов изучения взаимоотношения элементов динамических систем является корреляционный анализ, применяемый авторами статьи в настоящей работе. Используемая методика применялась ранее в работах [13, 23].

Рис. 2. Графики годовых чисел землетрясений Байкальского региона и трех районов БРС (А), а также шести участков БРС (В), зарегистрированных в 1968–2014 гг. с энергетическим классом $K_p \geq 8$
Fig. 2. Graphs of the annual number of earthquakes in the Baikal region and three regions of the BRS (A) and six sections of the BRS (B), registered in 1968–2014 with energy class $K_p \geq 8$



1 2 3 4

1 — Байкальский регион; районы БРС (2–4): 2 — первый, 3 — второй, 4 — третий
 1 — Baikal region; regions of the BRS (2–4): 2 — first, 3 — second, 4 — third

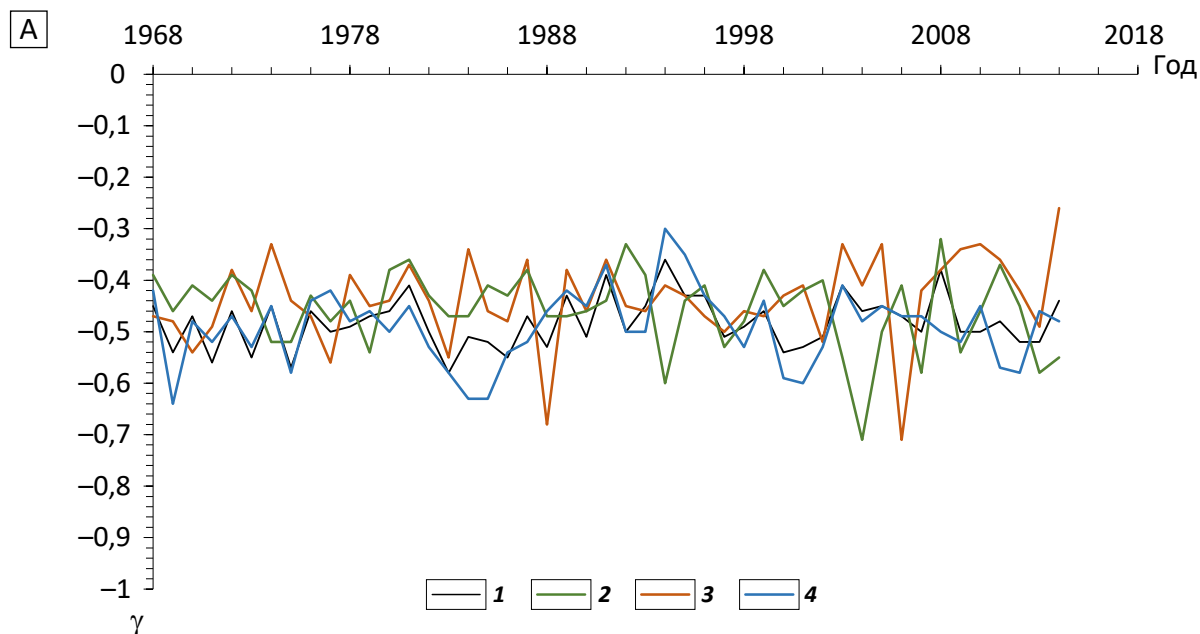


1 2 3 4 5 6

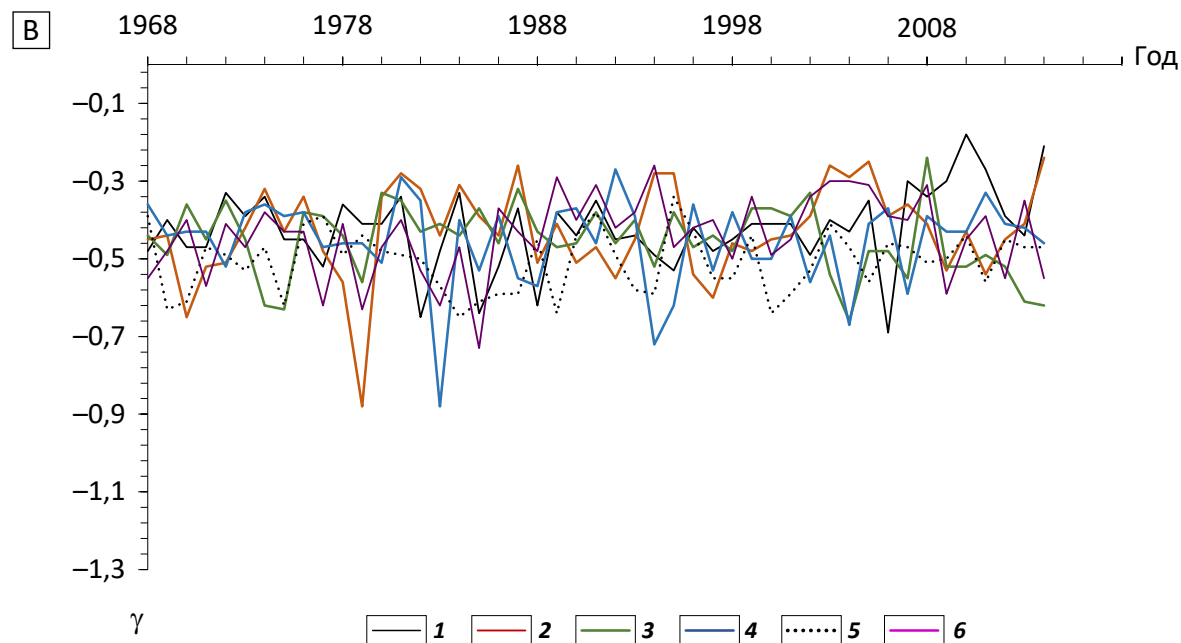
Участки БРС (1–6): 1 — первый, 2 — второй, 3 — третий, 4 — четвертый, 5 — пятый, 6 — шестой
 Sections of the BRS (1–6): 1 — first, 2 — second, 3 — third, 4 — fourth, 5 — fifth, 6 — sixth

Рис. 3. Графики годовых значений наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона и трех районов БРС (А) и шести участков БРС (В), зарегистрированных в 1968–2014 гг. с энергетическим классом $K_p \geq 8$

Fig. 3. Graphs of annual values of slopes of earthquake frequency graphs in the Baikal region and three regions of the BRS (A) and six sections of the BRS (B), registered in 1968–2014 with energy class $K_p \geq 8$



1 — Байкальский регион; **районы БРС (2–4): 2** — первый, **3** — второй, **4** — третий
1 — Baikal region; **regions of the BRS (2–4): 2** — first, **3** — second, **4** — third



Участки БРС (1–6): 1 — первый, **2** — второй, **3** — третий, **4** — четвертый, **5** — пятый, **6** — шестой
Sections of the BRS (1–6): 1 — first, **2** — second, **3** — third, **4** — fourth, **5** — fifth, **6** — sixth

Для исследования вариации параметров сейсмического процесса годовые ряды N и γ Байкальского региона, трех районов и шести участков БРС разделены на выборки длиной в 3 (L_3), 5 (L_5) и 10 (L_{10}) лет, временной сдвиг между выборками сравниваемых пар территорий равен 0, а шаг расчетов составляет 1 год. По выборкам одной длины рассчитаны коэффициенты парной корреляции ρ годовых значений N и γ сравниваемых территорий, а полученное значение ρ приписывается середине временного интервала каждой реализации. Для представления результатов в обобщенном виде и статистической оценки значимости корреляций в сейсмическом процессе рассчитаны суммарные коэффициенты корреляции, нормированные на число коррелируемых пар территорий S/n . Высокое значение нормированного коэффициента корреляции $S/n \geq 0,6$ определяют временные периоды синхронизации и когерентности изучаемых параметров сейсмического процесса. Высокие значения коэффициентов корреляции $\rho \geq 0,6$ указывают на эпизоды синхронизации между двумя конкретными территориями.

Результаты

Рассмотрение коэффициентов корреляции ρ чисел землетрясений N при разных длинах реализации для Байкальского региона с каждым районом и участком показало, что в целом значения варьируют в пределах $-1 \leq \rho \leq 1$ и наблюдаются большие временные интервалы для всех пар территорий при различных длинах реализации, в которых отмечаются синхронизации годовых чисел землетрясений. Интересно, что в паре «Байкальский регион — третий район» синхронизации наблюдаются на протяжении всего исследуемого временного интервала при всех длинах реализации. Синхронизации на протяжении почти всего изучаемого временного интервала отмечается также в паре «Байкальский регион — пятый участок» при длине реализации L_{10} . При той же длине реализации эпизоды синхронизаций отсутствуют в паре «Байкальский регион — второй участок».

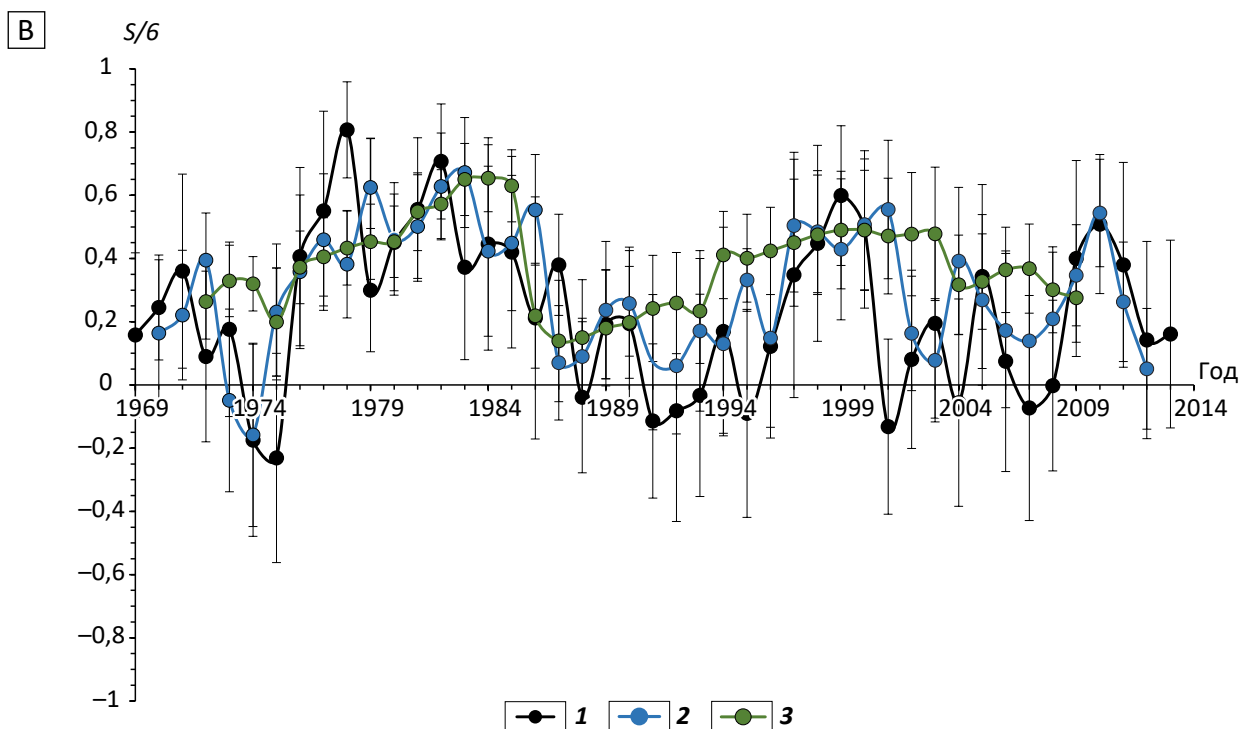
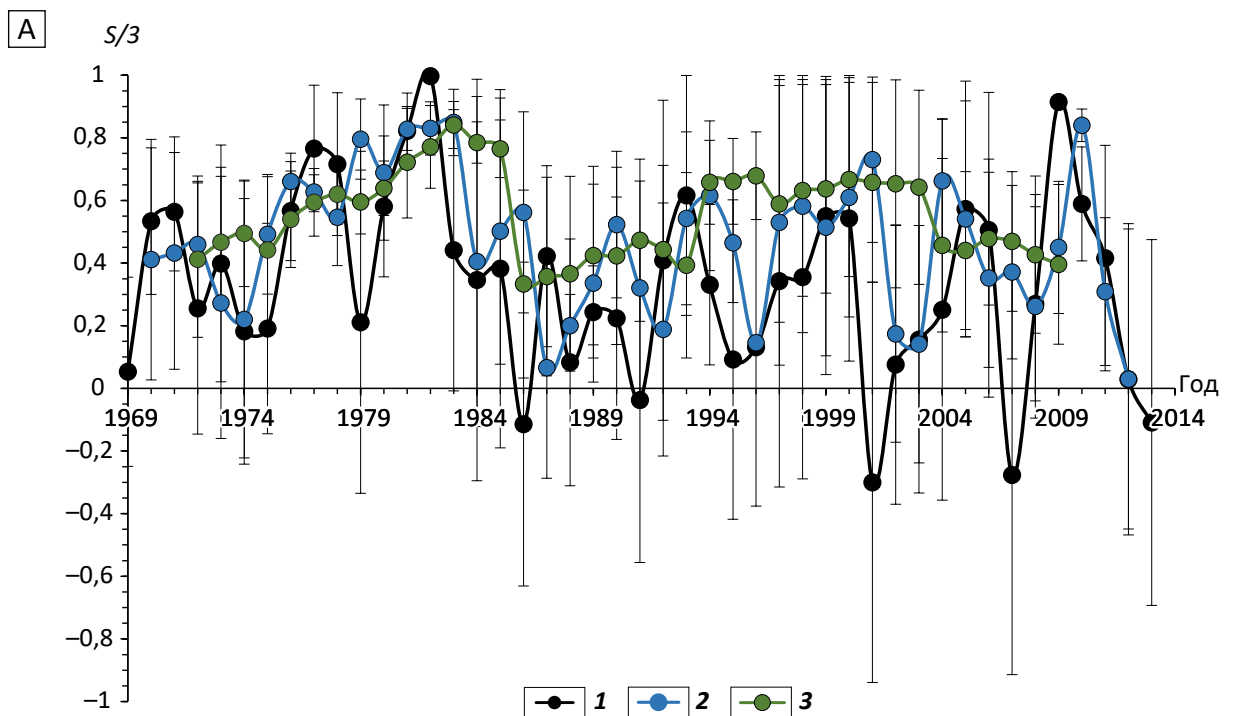
На рис. 4 приведены графики значений нормированной суммарной корреляции S/n годовых чисел землетрясений N Байкальского региона и трех районов (рис. 4 А), а также Байкальского региона и шести участков (рис. 4 В) при длинах реализации 3, 5 и 10 лет. Можно отметить, что значение параметра на всех графиках варьирует, а графики становятся более гладкими с увеличением длины реализации. Из рис. 4 А видно, что при длине реализации L_3 для значений N Байкальского региона и трех районов эпизоды высоких корреляций наблюдаются во второй половине 1970-х гг. первой половине 1980-х гг. ($S/3_{1977} = 0,77 \pm 0,2$, $S/3_{1978} = 0,72 \pm 0,23$, $S/3_{1981} = 0,82 \pm 0,12$, $S/3_{1982} = 1 \pm 0,00$), начале 1990-х гг. ($S/3_{1993} = 0,62 \pm 0,38$) и конце 2000-х гг. ($S/3_{2009} = 0,91 \pm 0,01$). Максимум $S/3$ отмечаются в 1981–1983 гг. ($S/3_{1982} = 1 \pm 0,00$), а минимум наблюдается в 2000–2002 гг., когда $S/3_{2001} = -0,3 \pm 0,64$. Следует подчеркнуть, что во многих случаях прослеживаются высо-

кие значения стандартных отклонений, указывающие на значительный разброс данных. Наиболее достоверно (на уровне трех стандартных отклонений) выделяются временные интервалы высоких корреляций N в части временных интервалов 1980-х гг. и конце 2000-х гг., когда даже на уровне трех стандартных отклонений сохраняются значения $S/n \geq 0,6$. При длине реализации L_5 эпизоды высоких корреляций отмечаются во второй половине 1970-х гг. первой половине 1980-х гг. ($S/3_{1976} = 0,66 \pm 0,09$, $S/3_{1977} = 0,63 \pm 0,06$, $S/3_{1979} = 0,8 \pm 0,13$, $S/3_{1980} = 0,69 \pm 0,22$, $S/3_{1981} = 0,83 \pm 0,07$, $S/3_{1982} = 0,83 \pm 0,09$, $S/3_{1983} = 0,85 \pm 0,11$), середине и конце 1990-х и 2000-х гг. ($S/3_{1994} = 0,62 \pm 0,24$, $S/3_{2000} = 0,61 \pm 0,38$, $S/3_{2001} = 0,73 \pm 0,26$, $S/3_{2004} = 0,66 \pm 0,2$, $S/3_{2010} = 0,84 \pm 0,05$). В данном случае $S/3$ достигают максимума в 1981–1985 гг. ($S/3_{1983} = 0,85 \pm 0,11$), а минимум значений наблюдается в 2010–2014 гг. ($S/3_{2012} = 0,03 \pm 0,48$). Заметим, что при увеличении длины реализации на уровне трех стандартных отклонений также наблюдаются два временных интервала высоких корреляций чисел землетрясений: в начале 1980-х гг. и конце 2000-х гг., а также имеется такой интервал в начале 2000-х гг. При длине реализации L_{10} эпизоды высоких корреляций наблюдаются почти на протяжении всего исследуемого временного промежутка: с 1976 по 2008 гг. ($S/3_{1980} = 0,64 \pm 0,09$, $S/3_{1981} = 0,72 \pm 0,18$, $S/3_{1982} = 0,77 \pm 0,13$, $S/3_{1983} = 0,84 \pm 0,08$, $S/3_{1984} = 0,79 \pm 0,07$, $S/3_{1985} = 0,77 \pm 0,09$, $S/3_{1994} = 0,66 \pm 0,13$, $S/3_{1995} = 0,66 \pm 0,14$, $S/3_{1996} = 0,68 \pm 0,14$, $S/3_{1998} = 0,63 \pm 0,34$, $S/3_{1999} = 0,64 \pm 0,33$, $S/3_{2000} = 0,67 \pm 0,31$, $S/3_{2001} = 0,66 \pm 0,32$, $S/3_{2002} = 0,65 \pm 0,32$, $S/3_{2005} = 0,64 \pm 0,31$), за исключением некоторых периодов, а максимум $S/3$ наблюдаются в 1979–1988 гг. ($S/3_{1985} = 0,84 \pm 0,08$). Минимум $S/3$ достигается в 1982–1991 гг. ($S/3_{1986} = 0,33 \pm 0,3$). На уровне трех стандартных отклонений при данной длине реализации сохраняется только интервал времени в начале 1980-х гг., когда $S/3$ остается высоким. Из рис. 4 В видно, что в Байкальском регионе и шести участках БРС при длине реализации L_3 имеются эпизоды высоких корреляций чисел землетрясений N в конце 1970-х и начале 1980-х гг. ($S/6_{1978} = 0,81 \pm 0,15$, $S/6_{1982} = 0,71 \pm 0,18$), причем в 1977–1979 гг. $S/6$ имеет максимальное значение $S/6_{1978} = 0,81 \pm 0,15$, а минимальное в 1974–1976 гг. ($S/6_{1975} = -0,23 \pm 0,33$). При длине реализации пять лет эпизоды высокой корреляции наблюдаются в конце 1970-х гг. первой половине 1980-х гг. ($S/6_{1979} = 0,63 \pm 0,16$, $S/6_{1982} = 0,63 \pm 0,17$, $S/6_{1983} = 0,67 \pm 0,17$) с максимумом в 1981–1985 гг. ($S/6_{1982} = 0,63 \pm 0,17$) и минимумом в 1972–1976 гг. ($S/6_{1974} = -0,16 \pm 0,29$). При длине реализации L_{10} высокие корреляции имеются в конце 1970-х – 1980-х гг. ($S/6_{1983} = 0,65 \pm 0,11$, $S/6_{1984} = 0,65 \pm 0,11$, $S/6_{1985} = 0,63 \pm 0,11$) с максимумом $S/6$ в 1979–1989 гг. ($S/6_{1983} = S/6_{1984} = 0,65 \pm 0,11$) и минимумом в 1984–1993 гг. ($S/6_{1988} = 0,15 \pm 0,18$).

Коэффициенты корреляции ρ наклонов графиков повторяемости γ землетрясений Байкальского региона с каждым районом и участком в целом

Рис. 4. Графики нормированной суммарной корреляции S/n выборок значений годовых чисел землетрясений N с $K_p \geq 8$, произошедшими в пределах Байкальского региона в 1968–2014 гг.

Fig. 4. Graphs of the normalized total correlation S/n of samples of values of the annual numbers of earthquakes N with $K_p \geq 8$ that occurred within the Baikal region in 1968–2014



Длина реализации (1–3): 1 — 3 года, 2 — 5 лет, 3 — 10 лет

Implementation length, years (1–3): 1 — 3, 2 — 5, 3 — 10

A — Байкальский регион и три района, B — Байкальский регион и шесть участков. Значение S/n для каждого временного интервала привязана к его середине

A — Baikal region and three districts, B — Baikal region and six sections. The S/n value for each time interval is tied to its middle

варьируют в пределах $-1 \leq \rho \leq 1$. Высокие корреляции наблюдаются при всех длинах реализаций в каждой паре территорий. В паре «Байкальский регион — третий район БРС» значения $S/3 \geq 0,6$ наблюдаются на протяжении почти всего исследуемого периода времени, а в паре «Байкальский регион — второй район БРС» таким значением характеризуются только 1975–1984 гг. В паре «Байкальский регион — первый участок БРС» также присутствует всего один эпизод с высокой корреляцией параметра при длине реализации 10 лет — 1984–1993 гг.

На рис. 5 приведены графики нормированной суммарной корреляции S/n выборки значений наклонов графиков повторяемости землетрясений γ Байкальского региона и трех районов, а также Байкальского региона и шести участков при длине реализации 3 года, 5 и 10 лет. На графиках наблюдаются вариации значений S/n и сглаживание формы графиков при увеличении длины реализации. Из рис. 5А видно, что при длине реализации 3 года эпизоды высоких корреляций наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона и трех районов наблюдаются в начале и середине 1970-х гг. ($S/3_{1971} = 0,75 \pm 0,23$, $S/3_{1972} = 0,97 \pm 0,01$, $S/3_{1975} = 0,6 \pm 0,19$), начале и середине 1980-х гг. ($S/3_{1980} = 0,74 \pm 0,14$, $S/3_{1981} = 0,95 \pm 0,03$, $S/3_{1982} = 0,99 \pm 0,00$, $S/3_{1986} = 0,76 \pm 0,23$), конце 1980-х — начале 1990-х гг. ($S/3_{1990} = 0,81 \pm 0,16$), второй половине 1990-х гг. ($S/3_{1997} = 0,71 \pm 0,14$, $S/3_{1998} = 0,69 \pm 0,17$) и середине 2000-х гг. ($S/3_{2004} = 0,7 \pm 0,15$). Максимальное значение $S/3$ отмечается в 1981–1983 гг. ($S/3_{1982} = 0,99 \pm 0,00$). Минимальное значение коэффициент $S/3$ принимает в 1978–1980 гг. ($S/3_{1979} = -0,34 \pm 0,31$). На уровне трех стандартных отклонений высокие корреляции сохраняются в два интервала времени: начале 1970-х гг. и начале 1980-х гг. При длине реализации L_5 эпизоды высоких корреляций наблюдаются в первой половине 1970-х гг. ($S/3_{1970} = 0,65 \pm 0,2$, $S/3_{1973} = 0,64 \pm 0,28$), конце 1970-х — первой половине 1980-х гг. ($S/3_{1981} = 0,79 \pm 0,16$, $S/3_{1982} = 0,78 \pm 0,07$, $S/3_{1983} = 0,77 \pm 0,04$) и второй половине 1990-х гг. ($S/3_{1997} = 0,74 \pm 0,02$) с достижением максимального значения $S/3$ в 1979–1983 гг. ($S/3_{1981} = 0,79 \pm 0,16$) и минимального значения в 1976–1980 гг. ($S/3_{1978} = 0,09 \pm 0,26$). Имеется два временных интервала, в течение которых высокая корреляция наклонов графиков повторяемости землетрясений сохраняется на уровне трех стандартных отклонений: эти интервалы присутствуют в начале 1980-х гг. и начале 1990-х гг. При длине реализации L_{10} наблюдается один продолжительный эпизод высокой корреляции, охватывающий вторую половину 1970-х—первую половину 1980-х гг. ($S/3_{1978} = 0,61 \pm 0,1$), а минимум $S/3$ достигается в 2004–2013 гг. ($S/3_{2008} = 0,21 \pm 0,1$). Из рис. 5 В видно, что эпизоды высокой корреляции наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона и шести участков при длине реализации L_3 наблюдаются в середине 1970-х ($S/6_{1974} = 0,71 \pm 0,21$, $S/6_{1975} = 0,72 \pm 0,09$), начале 1980-х гг. ($S/6_{1981} = 0,69 \pm 0,11$, $S/6_{1982} = 0,83 \pm 0,08$), начале и конце 1990-х гг. ($S/6_{1991} = 0,64 \pm 0,29$, $S/6_{1998} = 0,65 \pm 0,14$) и 2000-х гг.

($S/6_{2003} = 0,62 \pm 0,26$). В 1981–1983 гг. значение суммарного нормированного коэффициента корреляции $S/6$ достигает максимума в 1981–1983 гг. $S/6_{1982} = 0,8 \pm 0,08$, а минимальное значение достигается в 1992–1994 гг., когда $S/6_{2003} = -0,22 \pm 0,39$. На уровне трех стандартных отклонений высокие корреляции сохраняются только во временном интервале начала 1980-х гг. При длине реализации L_5 высокие корреляции наблюдаются в первой половине 1980-х гг. ($S/6_{1982} = 0,7 \pm 0,08$, $S/6_{1983} = 0,64 \pm 0,08$) с достижением максимума в 1980–1984 гг. и минимума в 1992–1996 гг. ($S/6_{1994} = -0,09 \pm 0,27$). При длине реализации L_{10} эпизоды высоких корреляций наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона и шести участков отсутствуют.

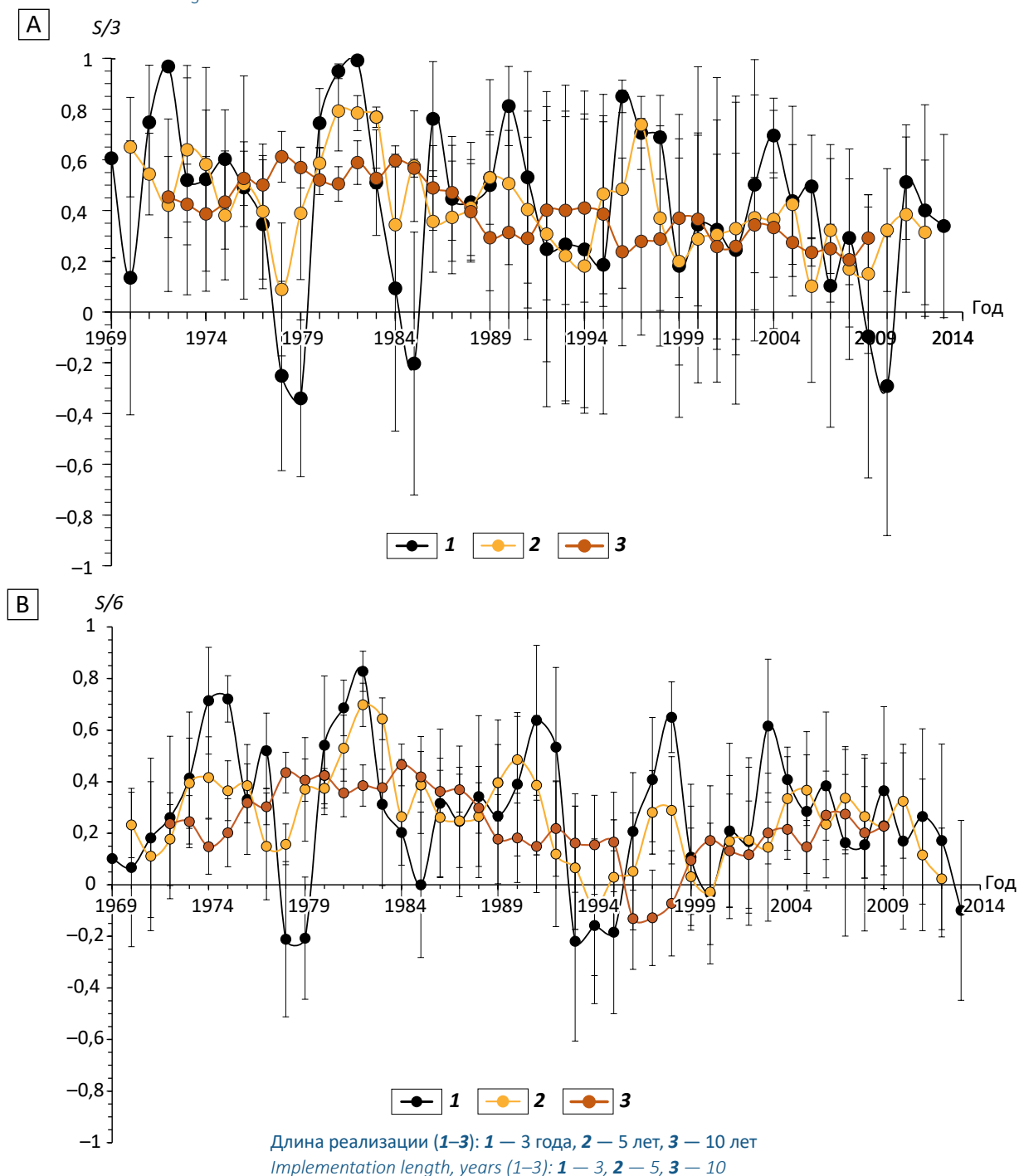
Обсуждения

В начале обсуждения результатов исследования эпизодов высоких корреляций скорости потока и наклонов графиков повторяемости землетрясений Байкальского региона и территорий БРС следует отметить, что высокие значения коэффициентов корреляции параметров могут быть связаны с происходящими группами землетрясений. Такой эффект может наблюдаться для пар территорий, в пределах которых произошла крупная группа землетрясений. Однако влияние такого эффекта снижается путем изучения корреляций параметров одновременно в нескольких комбинациях территорий и применения суммарных нормированных коэффициентов корреляции S/n .

Корреляционный анализ чисел землетрясений и наклонов графиков повторяемости землетрясений показал присутствие эпизодов высокой корреляции этих параметров в литосфере Байкальского региона. При анализе чисел землетрясений наиболее надежно и достоверно (с сохранением на уровне трех стандартных отклонений) выделяются эпизоды высокой корреляции в конце 1970-х — начале 1980-х и конце 2000-х гг. для Байкальского региона и районов при разных длинах реализации. При анализе наклонов графиков повторяемости землетрясений на территориях Байкальского региона и трех районов при длине реализации L_3 наиболее достоверно выделены эпизоды высокой корреляции в начале 1970-х гг. и начале 1980-х гг. и при длине реализации L_5 в начале 1980-х и конце 1990-х гг., а также в начале 1980-х гг. на территориях Байкальского региона и шести участков при длине реализации L_3 . При различных длинах реализаций для одинаковых комбинаций территорий высокие корреляции одних и тех же параметров сейсмического процесса наблюдаются обычно примерно в одни и те же временные периоды. Это особенно справедливо для длин реализации L_3 и L_5 , в то время как для L_{10} такая закономерность выражена слабее. При сопоставлении промежутков времени высокой корреляции чисел землетрясений и наклонов графиков повторяемости сейсмических событий для одних и тех же территорий видно, что высокие корреляции

Рис. 5. Графики нормированной суммарной корреляции S/n выборок значений наклонов графиков повторяемости γ землетрясений с $K_p \geq 8$, произошедшими в пределах Байкальского региона в 1968–2014 гг.

Fig. 5. Graphs of the normalized total correlation S/n of samples of the slope values of the frequency graphs γ of earthquakes with $K_p \geq 8$ that occurred within the Baikal region in 1968–2014



А — Байкальский регион и три района, Б — Байкальский регион и шесть участков. Значение S/n для каждого временного интервала привязана к его середине

A — Baikal region and three districts, B — Baikal region and six sections. The S/n value for each time interval is tied to its middle

этих параметров наблюдаются одновременно только в конце 1970-х – начале 1980-х гг. при длинах реализации L_3 и L_5 . Это наблюдение справедливо как для комбинаций территорий Байкальского региона и трех районов, так и Байкальского региона и шести участков. Следует отметить, что периоды

одновременной высокой корреляции двух параметров сейсмичности в Байкальском регионе и районах сохраняются в основном на уровне два–три стандартных отклонения, в то время как для Байкальского региона и участков такие периоды не сохраняются уже на уровне двух стандартных откло-

нений. Значения стандартных отклонений во всех таких случаях не превышают $\sigma = 0,18$.

Применение корреляционного анализа позволило выявить кратковременные эпизоды синхронизации годовых чисел и наклонов графиков повторяемости землетрясений в литосфере Байкальского региона, районов и участков БРС. Эпизод синхронизации конца 1970-х – начала 1980-х гг., выделяющийся уровнем корреляции, найден в результате анализа обоих используемых в данной работе параметров сейсмического процесса. В работе [13] при изучении корреляции годовых чисел землетрясений, произошедших в БРС, районах и участках в 1964–2001 гг., в указанный период времени также выделяется эпизод синхронизации. Автором приведенной работы предложено считать этот эпизод доминирующим явлением в литосфере БРС в изучаемый интервал времени и сделан вывод о том, что перестройки напряжений в литосфере БРС, происходящие в это время, «находит статистически значимое отражение в корреляции скорости потока толчков на всех исследуемых территориях». Результаты, полученные в нашей работе, не только подтверждают этот вывод, но и свидетельствуют о его справедливости для годовых значений наклонов графиков повторяемости землетрясений при тех же самых длинах реализации, тем самым укрепляя значимость результата.

Полученные результаты означают, что в разных частях БРС одновременно происходят перестройки напряжений, хотя территории разнесены в пространстве. Заметим, что эпизод синхронизации параметров сейсмического режима конца 1970-х – первой половины 1980-х гг. соответствует по времени активизации выявленных в работе [24] структур-аттракторов рифтогенеза (САР) — областей среды и периодов времени, в которые доминируют землетрясения-сбросы, характерные для рифтовых систем. Структуры-аттракторы рифтогенеза расположены в Южнобайкальской, Хубсугульской и Муйской впадинах, т. е. в каждом из трех районов БРС, и развиваются в колебательном режиме. В основе механизма формирования и функционирования САР лежат процессы самоорганизации во флюидизированных расплавах и горных породах при разных режимах их декомпрессии. Структуры-аттракторы рифтогенеза формируют неустойчивость, линейность и цикличность геодинамических и тектонофизических процессов в литосфере БРС. Для окружающей САР геологической среды быстрое локальное расширение ведет к изменению горизонтальных составляющих напряжения. В локальной области САР эти процес-

сы приводят к резкому ослаблению и затем к постепенному нарастанию рифтогенных процессов [25]. Эпизоды высокой корреляции параметров во второй половине 1990-х – начале 2000-х гг. могут быть также обусловлены активизацией САР в конце 1990-х гг. В работах [26, 27] показано, что в конце 1990-х гг. имеет место активизация Южнобайкальской САР, однако, с учетом того, что в более ранние периоды одновременно активизировались три САР, можно уверенно предположить активизацию всех трех САР и в данный временной период. Принимая во внимание то, что, согласно приведенным работам, активизации САР происходят с периодичностью около 10 лет, можно предположить, что САР активизировались и в конце 2000-х гг. Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что активизации САР, происходящие одновременно в разных районах БРС, способствуют синхронизациям параметров сейсмического режима территорий БРС на разных иерархических уровнях. Появление эпизодов синхронизации годовых чисел землетрясений и наклонов графиков повторяемости может свидетельствовать о прохождении деформационных волн, генерируемых в областях САР или зонах разломов. В работе [28] предполагается, что области интенсивного растяжения земной коры могут являться наиболее подходящими зонами для формирования деформационных волн. Однако прямых доказательств существования деформационных волн не найдено, а дальнейшее изучение синхронизаций сейсмического процесса может способствовать решению этой задачи.

Заключение

В настоящей работе были рассчитаны суммарные коэффициенты корреляции годовых чисел и годовых значений наклонов графиков повторяемости представительных землетрясений Байкальского региона с тремя районами и шестью участками БРС, нормированные на число коррелируемых пар территорий БРС по длинам реализаций 3, 5 и 10 лет. Анализ результатов показал присутствие эпизодов высокой корреляции обоих параметров для Байкальского региона, районов и участков. При изменении длины реализации эпизоды синхронизаций одного и того же параметра наблюдаются примерно в одно и то же время. Высокие корреляции изучаемых параметров отмечаются в конце 1970-х – начале 1980-х гг. при длинах реализации L_3 и L_5 . Этот эпизод высокой корреляции параметров, а также эпизоды высокой корреляции в конце 1990-х – начале 2000-х гг. совпадает по времени с активизацией в БРС САР.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011. В работе задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682. В работе использованы данные, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список источников

1. Dey B., Dikshit P., Sehpal S., Trehan V., Sehgal V.K. Intelligent solution for earthquake data analysis and prediction for future smart cities // *Computers and industrial engineering*. – 2022. – Vol. 170. – 108368. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108368.
2. Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M., Allen C.R. Intermediate term prediction of occurrence times of strong earthquakes // *Nature*. – 1988. – Vol. 335. – pp. 690–694.
3. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных Камчатских землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. – 1999. – № 4–5. – С. 63–72.
4. Wiemer S., Wyss M. Seismic quiescence before the Landers (M = 7.5) and Big Bear (M = 6.5) 1992 earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1994. – Vol. 84. – № 3. – pp. 900–916. DOI: 10.1785/BSSA0840030900.
5. Amorèse D., Grasso J.-R., Rydelek P.A. On varying b-values with depth: results from computer-intensive tests for Southern California // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 180. – Iss. 1. – pp. 347–360. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04414.x.
6. Лукк А.А., Попандопуло Г.А. Надежность определения параметров распределения Гутенберга–Рихтера для слабых землетрясений Гармского района в Таджикистане // *Физика Земли*. – 2012. – № 9–10. – С. 31–55.
7. Лю Ц., Родина С.Н., Рожожин Е.А. Палеоземлетрясения и долговременный сейсмический режим в зоне разломов Лунмэншань, юго-западный Китай // *Физика Земли*. – 2017. – № 6. – С. 40–44. DOI: 10.7868/S0002333717060035.
8. Radziminovich N.A., Miroshnichenko A.I., Zuev F.L. Magnitude of completeness, b-value, and spatial correlation dimension of earthquakes in the South Baikal Basin, Baikal Rift System // *Tectonophysics*. – 2019. – Vol. 759. – pp. 44–57. DOI: 10.1016/j.tecto.2019.04.002.
9. Оунаков Е.И., Ботева Е.А. Spatial and time variation of seismicity before strong earthquakes in the southern part of the Balkans // *Annals of geophysics*. – 2021. – Vol. 64. – No. 4. – SE433. DOI: 10.4401/ag-8566.
10. Ogata Y., Imoto M., Katsura K. 3-D spatial variation of b-values of magnitude frequency distribution beneath the Kanto district, Japan // *Geophysical Journal International*. – 1991. – Vol. 104. – Iss. 1. – pp. 135–146. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb02499.x.
11. Marzocchi W., Sandri L. A review and new insights on the estimation of the b-value and its uncertainty // *Annals of Geophysics*. – 2003. – Vol. 46. – No. 6. – pp. 1271–1282.
12. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
13. Ключевский А.В. Эпизоды высокой корреляции годовых чисел землетрясений Байкальской рифтовой зоны // *Вулканология и сейсмология*. – 2011. – № 1. – С. 55–62.
14. Прозоров А.Г. Алгоритм прогноза землетрясений для региона Памира и Тянь-Шаня по комбинации удаленных афтершоков и затиший // *Компьютерный анализ геофизических полей*. – (Вычислительная сейсмология. Вып. 23). – М.: Наука, 1990. – С. 75–84.
15. Копничев Ю.Ф., Бастукас И., Соколова И.Н. Пары сильных землетрясений и геодинамические процессы в районе Центральной и Южной Азии // *Вулканология и сейсмология*. – 2002. – № 5. – С. 49–58.
16. Ключевский А.В. Современная динамика Байкальского рифта и особенности пространственно-временного распределения сильных землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. – 2003. – № 5. – С. 65–78.
17. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // *Доклады Академии наук СССР*. – 1979. – Т. 247. – № 4. – С. 829–831.
18. Голенецкий С.И., Демьянович В.М., Филина А.Г. Представительность землетрясений Южной Сибири и Монголии в 1980–1990 гг. // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. – Вып. 1. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – С. 83–85.
19. Байкальский филиал ФГБУ ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.seis-bykl.ru> (дата обращения: 13.03.2022).
20. Алтае-Саянский филиал ФГБУ ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.asgsr.ru> (дата обращения: 03.03.2022).
21. Ключевский А.В. Пространственно-временные вариации сейсмических моментов очагов землетрясений Байкальского региона // *Доклады Академии наук*. – 2000. – Т. 373. – № 5. – С. 681–683.
22. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // *Экспериментальная сейсмика. Труды Института физики Земли АН СССР*. – 1964. – № 32 (193). – С. 86–93.
23. Ключевский А.В., Баяр Г., Бум-Очир С. Эпизоды синхронизации годовых чисел землетрясений Монголо-Байкальского региона // *Доклады Академии наук*. – 2010. – Т. 431. – № 1. – С. 107–112.
24. Klyuchevskii A.V. Rifting Attractor Structures in the Baikal Rift System: Location and Effects // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2014. – Vol. 88. – pp. 246–256. DOI: 10.1016/j.jseaes.2014.03.009.
25. Летников Ф.А., Ключевский А.В. Структуры-аттракторы рифтогенеза в литосфере Байкальской рифтовой системы: природа и механизм образования // *Доклады Академии наук*. – 2014. – Т. 458. – № 1. – С. 52–56. DOI: 10.7868/S0869565214250203.
26. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Повышенные содержания ртути в воде истока реки Ангара: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. – 2020. – Т. 491. – № 2. – С. 77–81. DOI: 10.31857/S2686739720040076.
27. Ключевский А.В., Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М., Ключевская А.А. О связи сильных геодинамических воздействий с повышением содержания ртути в воде истока р. Ангара (Байкальская рифтовая зона) // *Геология и геофизика*. – 2021. – Т. 62. – № 2. – С. 293–311. DOI: 10.15372/GIG2020150.
28. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // *Геология и геофизика*. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 1176–1190.

References

1. Dey B., Dikshit P., Sehpal S., Trehan V., Sehgal V.K. Intelligent solution for earthquake data analysis and prediction for future smart cities. *Computers and industrial engineering*. 2022;170:108368. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108368.

2. Keilis-Borok V. I., Knopoff L., Rotwain I.M., Allen C.R. Intermediate term prediction of occurrence times of strong earthquakes. *Nature*. 1988;335:P. 690–694.
3. Sobolev G.A. Stadii podgotovki sil'nykh Kamchatskikh zemletryasenii [Stages of preparation of strong Kamchatka earthquakes]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 1999;(4-5):63–72.
4. Wiemer S., Wyss M. Seismic quiescence before the Landers (M = 7.5) and Big Bear (M = 6.5) 1992 earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994;84(3):900–916. DOI: 10.1785/BSSA0840030900.
5. Amorèse D., Grasso J.-R., Rydelek P.A. On varying b-values with depth: results from computer-intensive tests for Southern California. *Geophysical Journal International*. 2010;180(1):347–360. DOI:10.1111/j.1365-246X.2009.04414.x.
6. Lukk A.A., Popandopoulos G.A. Reliability of determining the parameters of Gutenberg-Richter distribution for weak earthquakes in Garm, Tajikistan. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2012;48(9-10):698–720. DOI: 10.1134/S1069351312090017.
7. Liu J., Rodina S.N., Rogozhin E.A. Paleoearthquakes and long-term seismic regime in the Longmenshan fault zone, southwest China. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017;53(6):840–844. DOI: 10.1134/S1069351317060039.
8. Radziminovich N.A., Miroshnichenko A.I., Zuev F.L. Magnitude of completeness, b-value, and spatial correlation dimension of earthquakes in the South Baikal Basin, Baikal Rift System. *Tectonophysics*. 2019;759:44–57. DOI: 10.1016/j.tecto.2019.04.002.
9. Oynakov E.I., Botev E.A. Spatial and time variation of seismicity before strong earthquakes in the southern part of the Balkans. *Annals of Geophysics*. 2021;64(4):SE433. DOI:10.4401/ag-8566/.
10. Ogata Y., Imoto M., Katsura K. 3-D spatial variation of b-values of magnitude frequency distribution beneath the Kanto district, Japan. *Geophysical Journal International*. 1991;104(1):135–146. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb02499.x.
11. Marzocchi W., Sandri L. A review and new insights on the estimation of the b-value and its uncertainty. *Annals of Geophysics*. 2003;46(56):1271–1282.
12. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. Fizika zemletryasenii i predvestniki [Physics of Earthquakes and Precursors]. Moscow: Nauka; 2003. 270 p.
13. Klyuchevskii A.V. Episodes of high correlation between annual rates of earthquakes the Baikal rift zone. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011;5(1):53–59. DOI: 10.1134/S0742046311010039.
14. Prozorov A.G. Algoritm prognoza zemletryasenii dlya regiona Pamira i Tyan'_Shanya po kombinatsii udalennykh aftershokov i zatishii [Algorithm for earthquake prediction for the Pamir and Tien Shan region based on a combination of remote aftershocks and lulls]. In: Komp'yuternyi analiz geofizicheskikh polei. Moscow: Nauka; 1990. pp. 75–84.
15. Kopnichev Yu.F., Bastukas I., Sokolova I.N. Pary sil'nykh zemletryasenii i geodinamicheskie protsessy v raione Tsentral'noi i Yuzhnoi Azii [Pairs of strong earthquakes and geodynamic processes in the region of Central and South Asia]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2002;(5):49–58.
16. Klyuchevskii A.V. Sovremennaya dinamika Baikal'skogo rifta i osobennosti prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya sil'nykh zemletryasenii [The present-day dynamics of the Baikal rift and the spatio-temporal distribution of large earthquakes]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2003;(5):65–78.
17. Sadovskii M.A. Estestvennaya kuskovatost' gornoj porody [Natural lumpiness of rock]. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences*. 1979;247(4):829–831.
18. Golenetskii S.I., Dem'yanovich V.M., Filina A.G. Predstavitel'nost' zemletryasenii Yuzhnoi Sibiri i Mongolii v 1980–1990 gg. [Representativeness of earthquakes in Southern Siberia and Mongolia in the 1980s–1990s]. In: Seismichnost' i seismicheskoe raionirovanie Severnoi Evrazii. Iss. 1. Moscow: IFZ RAN; 1993. pp. 83–85.
19. Baikal'skii filial FGBU FITS «Edinaya geofizicheskaya sluzhba Rossiiskoi akademii nauk» [Baikal Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”]. Available at: <http://www.seis-bykl.ru> (accessed 03.13.2022).
20. Altae-Sayanskii filial FGBU FITS «Edinaya geofizicheskaya sluzhba Rossiiskoi akademii nauk» [Altai-Sayan Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”]. Available at: <http://www.asgsr.ru> (accessed 03.13.2022).
21. Klyuchevskii A.V. Spatiotemporal variations in seismic moments of earthquakes foci in the Baikal region. *Doklady Earth Sciences*. 2000;373A:1040–1042.
22. Rautian T.G. Ob opredelenii ehnergii zemletryasenii na rasstoyaniyakh do 3000 km [On the determination of earthquake energy at distances up to 3000 km]. *Eksperimental'naya seismika. Trudy Instituta fiziki Zemli AN SSSR*. 1964;(32):86–93.
23. Klyuchevskii A.V., Bayar G., Bum-Ochir S. Synchronization episodes in annual numbers of earthquakes in the Mongolian-Baikal region. *Doklady Earth Sciences*. 2010;431(1):339–344. DOI: 10.1134/S1028334X10030165.
24. Klyuchevskii A.V. Rifting Attractor Structures in the Baikal Rift System: Location and Effects. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014;88:246–256. DOI: 10.1016/j.jseaes.2014.03.009.
25. Letnikov F.A., Klyuchevskii A.V. Riftogenesis attractor structures in the lithosphere of the Baikal rift system: nature and formation mechanism. *Doklady Earth Sciences*. 2014;458(1):1043–1046. DOI: 10.1134/S1028334X14090086.
26. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A. Elevated mercury in the water of the Angara river source: a response to geodynamic impacts and strong earthquakes. *Doklady Earth Sciences*. 2020;491(2):253–256. DOI: 10.1134/S1028334X20040078.
27. Klyuchevskii A.V., Grebenshchikova V.I., Kuz'min M.I., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A. The relationship between powerful geodynamic impacts and an increase in the mercury content of the water of the Angara river source (Baikal rift zone). *Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(2):293–311. DOI: 10.15372/GiG2020150.
28. Bykov V.G. Strain waves in the Earth: theory, field data, and models. *Russian Geology and Geophysics*. 2005;46(11):11176–1190.

Статья поступила в редакцию 10.06.2024 г., одобрена после рецензирования 25.09.2024 г., принята к публикации 27.11.2024 г.
The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Информация об авторах

Какоурова Анна Александровна

Кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник
ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: anna2015@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0003-0385-3458
SPIN-код: 3372-7797
AuthorID: 1081900

Демьянович Владимир Михайлович

Ведущий инженер
ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: vmdem@crust.irk.ru
AuthorID: 64968

Ключевская Анна Анатольевна

Кандидат биологических наук,
ведущий инженер
ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: annakl@crust.irk.ru
AuthorID: 97600

Джурик Василий Ионович

Доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник
ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: dzhurik@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0002-8082-5461
SCOPUS ID: 6602593180
Researcher ID: P-6614-2015
AuthorID: 982

Брыжак Евгений Вадимович

Кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией инженерной сейсмологии
и сейсмогеологии, старший научный сотрудник
ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: bryzhak@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0001-7550-4447
SPIN-код: 3053-8213
AuthorID: 711335

Information about authors

Anna A. Kakourova

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Junior Researcher
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: anna2015@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0003-0385-3458
SPIN-код: 3372-7797
AuthorID: 1081900

Vladimir M. Dem'yanovich

Lead Engineer
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: vmdem@crust.irk.ru
AuthorID: 64968

Anna A. Kluchevskaya

Candidate of Biological Sciences,
Lead Engineer
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: annakl@crust.irk.ru
AuthorID: 97600

Vasilii I. Dzhurik

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences,
Chief Researcher
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: dzhurik@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0002-8082-5461
SCOPUS ID: 6602593180
Researcher ID: P-6614-2015
AuthorID: 982

Evgenii V. Bryzhak

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Head of the Laboratory of Engineering Seismology
and Seismogeology, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: bryzhak@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0001-7550-4447
SPIN-код: 3053-8213
AuthorID: 711335