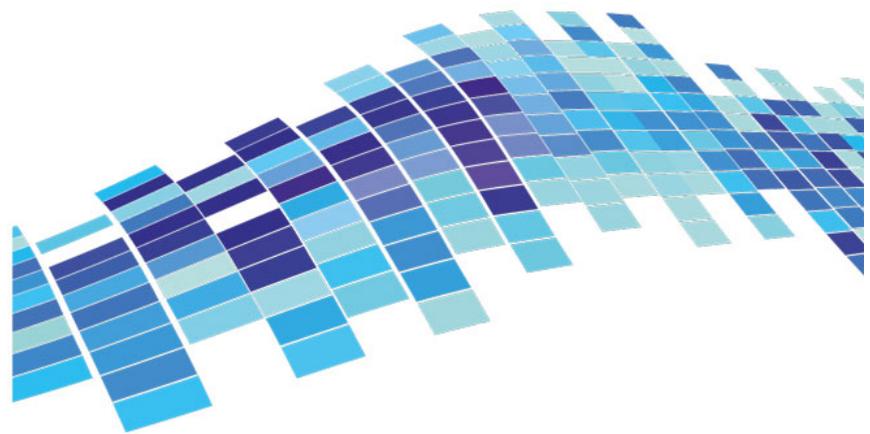


ISSN 2541-8912 (Print)
ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН



GEOSYSTEMS
of Transition Zones

2024 Том 8 № 4

Решением Научно-экспертного совета Морской коллегии
при Правительстве Российской Федерации
доктор геолого-минералогических наук, доцент, член редколлегии
нашего журнала, Ренат Белалович Шакиров награжден медалью
«За достижения в морской науке».

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон» поздравляют
Рената Белаловича и его коллектив с этой неординарной наградой
и желают ему дальнейших успехов в морских научных исследованиях
и экспертной работе на международных площадках.





Тектонофизическая модель очага тектонического землетрясения

С. А. Борняков¹*, А. А. Добрынина¹, И. А. Пантелеев², В. А. Саньков^{1,3},
Д. В. Салко¹, Г. В. Встовский⁴, А. И. Мирошниченко¹, А. Н. Шагун¹,
А. Е. Синцов⁵, А. А. Каримова^{1,3}

*E-mail: bornyak@crust.irk.ru

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

³Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

⁴ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», Москва, Россия

⁵АО ВО «Безопасность», Москва, Россия

Резюме. На основе опубликованных и авторских результатов физического моделирования процессов формирования зон разломов выявлены общие закономерности их структурно-динамического развития. Эти закономерности положены в основу авторской тектонофизической модели очага землетрясения, с вытекающим из нее предвестником. В качестве такого предвестника выступает процесс деформационной самоорганизации активных сегментов в очаге готовящегося землетрясения. Показано, что этот процесс поддается превентивной диагностике по данным деформационного и сейсмического мониторинга. Он проявляется в виде низкочастотных автоволновых колебаний непосредственно перед сейсмическим событием во временном интервале от первых дней до первых часов, что позволяет отнести его к краткосрочным.

Ключевые слова: зона разлома, сегментация, тектонофизическая модель, очаг тектонического землетрясения, самоорганизация, предвестники

Tectonophysical model of the tectonic earthquake focus

Sergey A. Bornyakov¹*, Anna A. Dobrynina¹, Ivan A. Panteleev², Vladimir A. Sankov^{1,3},
Denis V. Salko¹, Grigory V. Vstovsky⁴, Andrey I. Miroshnichenko¹, Artem N. Shagun¹,
Artem E. Sintsov⁵, Anastasia A. Karimova^{1,3}

*E-mail: bornyak@crust.irk.ru

¹Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia

²Institute of Continuum Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russia

³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

⁴ANO "Center for Industrial and Environmental Expertise", Moscow, Russia

⁵JSC VO "Safety", Moscow, Russia

Abstract. Based on the results of physical modeling of the processes of fault zone formation, general regularities of their structural and dynamic development were revealed. These regularities were used as the basis of the author's tectonophysical model of the tectonic earthquake focus, with a precursor resulting from it. Such a precursor is the self-organization of the deformation process of active segments in the focus of an impending earthquake. It was shown that this process can be diagnosed preventively using the deformation and seismic monitoring data and manifests itself in the form of low-frequency self-oscillations immediately before the seismic event in the time interval from the first days to the first hours. The stable manifestation of this precursor allows us to classify it as short-term.

Keywords: fault zone, segmentation, tectonophysical model, tectonic earthquake focus, self-organization, precursors

Для цитирования: Борняков С.А., Добрынина А.А., Пантелеев И.А., Саньков В.А., Салко Д.В., Встовский Г.В., Мирошниченко А.И., Шагун А.Н., Синцов А.Е., Каримова А.А. Тектонофизическая модель очага тектонического землетрясения. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 4, с. 313–327. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.313-327>; <https://www.elibrary.ru/xhqjfo>

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук на 2021–2025 гг. (проект № FWEF-2021-0009).

Введение

Проблема краткосрочного прогноза землетрясений в настоящее время остается нерешенной, несмотря на более чем полувековое привлечение к ее решению передовых интеллектуальных и технических мировых ресурсов. Системные исследования этой проблемы в нашей стране начались во второй половине прошлого века после серии разрушительных землетрясений. Сначала они были направлены на изучение «сейсмических швов», однако после смерти идеолога этого направления академика Г.А. Гамбурцева были переориентированы на сбор информации по предвестникам землетрясений [1, 2]. Бытовало твердое убеждение, что достаточно собрать по ним необходимую оригинальную базу и проблема будет решена. Предвестниковый оптимизм 1970-х годов постепенно начал спадать в 80-х – начале 90-х годов и сменился затем публичным признанием невозможности краткосрочного прогноза землетрясений [3, 4 и др.]. Несмотря на то что в последующие годы перечень видов предвестников существенно пополнился и количество их возросло, состояние проблемы осталось прежним и скептические настроения относительно краткосрочного прогноза по-прежнему сохраняются [5–7].

Потенциальная возможность решения любой научной проблемы определяется уровнем развития науки и техники. К примеру, та же погода до определенного момента считалась непредсказуемой, но с накоплением знаний о механизмах ее формирования и появлением компьютеров прогноз погоды стал явлением

For citation: Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Panteleev I.A., Sankov V.A., Salko D.V., Vstovsky G.V., Miroschnichenko A.I., Shagun A.N., Sintsov A.E., Karimova A.A. Tectonophysical model of the tectonic earthquake focus. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 4, pp. 313–327. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.313-327>; <https://www.elibrary.ru/xhqjfo>

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of the Earth's Crust of the SB RAS (No. FWEF-2021-0009).

обыденным. Что касается проблемы краткосрочного прогноза землетрясений, то можно констатировать, что научно-технический уровень 80–90-х годов был еще недостаточным для ее решения, поэтому неутешительный вывод о невозможности реализации такого прогноза был вполне правомерен.

За последнюю четверть века в науках о Земле в целом и в науке о землетрясениях в частности произошли существенные изменения.

Постепенно меняются представления об общих принципах эволюции геологических систем под влиянием идей современной термодинамики, синергетики, фрактальной геометрии и теории катастроф [8–11]. На смену детерминистским представлениям о геофизической среде как линейном континууме пришли представления о ней как о нелинейной, дискретной системе с фрактальными свойствами и сложным хаотическим поведением в обычном состоянии и детерминированным в критическом, переходном состоянии [12–16].

Аналогичные изменения происходят и в представлениях о физике очага тектонического землетрясения. Анализ существующих его моделей в историческом контексте показывает, что начиная со второй половины 1980-х годов формируется представление о нем как о сложной открытой нелинейной динамической системе, способной к самоорганизации в критическом предсейсмогенном состоянии [17–21 и др.].

Существенный прогресс произошел и в технике. Бурное развитие регистрирующей

аппаратуры и компьютерной техники существенно расширило возможности инструментального мониторинга для получения и комплексной обработки больших массивов оригинальных цифровых данных по геофизическим и другим параметрам с высокими разрешениями и точностью. Это позволяет фиксировать ранее не поддававшиеся регистрации явления в очаге землетрясения на завершающей стадии его подготовки как в природе, так и в его аналоге, воспроизводимом в моделях в лабораторных экспериментах.

Все это вместе взятое позволяет подойти к решению проблемы краткосрочного прогноза землетрясений на качественно новом концептуальном и техническом уровнях. На такой подход опираются прогнозные исследования авторов настоящей статьи, совокупный результат которых представлен в виде тектонофизической модели очага тектонического землетрясения (ТМОТЗ).

1. Концептуальные предпосылки тектонофизической модели очага землетрясения

Как правило, в основе прогноза малоизученного явления лежит его теоретическая модель. Для очага тектонического землетрясения (ОТЗ) существует более десяти моделей, предложенных в разное время (см. краткий обзор в работах [22, 23]). Не останавливаясь на их характеристике, отметим, что, несмотря на различные подходы к объяснению физических причин формирования ОТЗ, они, в большинстве своем, едины в трактовке самого акта сейсмогенерации и связывают его с сейсмогенной подвижкой по уже существующему или новообразованному разлому. При этом все модели представляют разлом в виде упрощенной геометрической плоскости, не учитывая ни его внутреннее строение, ни нелинейный характер деформационной динамики [23, 24]. Необходимость рассмотрения в прогнозных исследованиях разлома как объемной, трехмерной разрывной структуры неоднократно отмечалась в публикациях [25–30 и др.]. Кроме того, эти модели не учитывают активно развивающиеся представления о зонах разломов и вмещающей их литосфере как об открытых

нелинейных динамических системах с проявлением в них процессов самоорганизации в критическом состоянии [15, 16, 19, 20, 31–38].

Невозможность прямого наблюдения процесса подготовки ОТЗ в природе стимулировала воспроизведение его в лабораторных условиях с целью регистрации сопутствующих деформированию моделей явлений, рассматриваемых в качестве возможных предвестников. В большинстве случаев моделировался процесс прерывистого скольжения по готовому разлому (stick-slip) [39], за который принималась контактная плоскость между смещающимися относительно друг друга блоками, изготовленными из горных пород или искусственных материалов. Были получены многочисленные результаты, способствующие лучшему пониманию механизма подготовки импульсного смещения по модельному разлому и предшествующих ему физических явлений. Отметим два из этих результатов, имеющие прямое отношение к декларируемой авторской тектонофизической модели.

Первый отражает особенности пространственной динамики деформационного процесса в модели, выявленные по анализу мониторинга акустической эмиссии, и показывает, что при подготовке импульсного смещения по модельному разлому в деформацию вовлекается значительная часть приразломного объема модели [40, 41], что согласуется с приведенной выше информацией о необходимости рассмотрения разлома, вмещающего очаг землетрясения, как объемной структуры.

Второй результат лежит в русле отмеченных выше синергетических представлений о зонах разломов и вмещающей их литосфере. Он показывает особенности развития деформационного процесса в критическом состоянии нагруженной модели [42, 43]. Рассмотрим его детальнее.

В цитируемых экспериментах, выполненных на сервоуправляемой нагрузочной установке, в моделях, изготовленных из гранита, воспроизводился процесс прерывистого скольжения stick-slip по готовому разлому с изгибом. Совокупным результатом выполненных экспериментов явилась детализация деформационного процесса в критическом, «предсей-

могенном» состоянии. Было показано, что этот процесс развивается стадийно, что проявляется в изменении средней сдвиговой нагрузки во времени (рис. 1).

График (рис. 1) показывает вариации нагрузки на штампе прессы и характеризует деформационную динамику модельного разлома на временном интервале от 660 до 700 с, предваряющем реализацию сдвиговой импульсной подвижки по нему. На врезке этот момент показан серым квадратом. На отрезке N–O (рис. 1) фиксируется отклонение графика от линейности. В точке O достигается максимальное значение нагрузки на штампе прессы и система переходит в метастабильное состояние, сохраняющееся до точки A. На отрезке AB₂ реализуется метанестабильное состояние, подразделяющееся на подстадии ранней (отрезок AB₁) и поздней (отрезок B₁B₂) метанестабильности. За точкой B₂ развивается динамическая неустойчивость в виде импульсной подвижки. На первой, метастабильной стадии стартует и развивается в квазикриповом стационарном режиме процесс относительного смещения блоков с медленной релаксацией накопленных на межблоковом контакте напряжений, что обусловлено зарождением на нем микроочагов разрушения в виде небольших активизированных сегментов. В подстадию ранней метанестабильности продолжается медленный спад

напряжений за счет постепенного увеличения изолированных сегментов в плоскости разрыва. В подстадию поздней метанестабильности, именуемую также подстадией ускоренного синергизма, реализация деформаций нарастает и ускоряется. Синергизм проявляется непосредственно перед трансформацией квазистатического состояния в динамическое благодаря кооперативному поведению всех активизированных сегментов, т.е. их самоорганизации. При этом следует отметить, что в публикациях [42, 43] не поясняется суть этого процесса и как он может быть диагностирован.

Резюмируя приведенную выше информацию, еще раз подчеркнем два базовых экспериментальных результата, которые следует учитывать при построении модели ОТЗ, а именно:

- ОТЗ представляет собой объемную, трехмерную деформационную структуру, формирующуюся в зоне разлома;
- предвестником землетрясения является критическое динамическое состояние его очага, индикатором которого служит процесс самоорганизации первичных микроочагов разрушения в плоскости сместителя разлома непосредственно перед его сейсмогенным всплыванием.

2. Основные закономерности структурно-динамического развития зоны разлома, положенные в основу ТМОТЗ

Для понимания деталей формирования ОТЗ, а также механизма его подготовки и последующей реализации необходимо иметь представление об общих закономерностях структурно-динамического развития вмещающей его зоны разлома. Такие закономерности выявлены авторами на основе результатов многолетних экспериментальных исследований процессов формирования зон разломов в упруговязкопластичных моделях литосферы [44–48]. Остановимся на характеристике двух закономерностей, имеющих прямое отношение к созданию ТМОТЗ.

Первая закономерность связана с вариациями ширины зоны разлома в процессе его структурной эволюции. Зона разлома

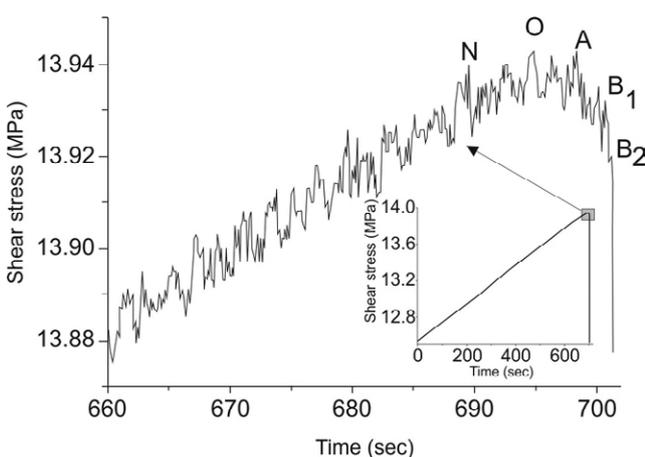


Рис. 1. График изменения сдвигового напряжения во времени перед импульсной подвижкой (малый график) и его увеличенный фрагмент в критической точке, показанной маленьким серым квадратом (по [43]).

Fig. 1. Plot of change in shear stress in time before impulse displacement (small plot) and its enlarged fragment at the critical point shown by a small gray square (according to [43]).

представляет собой стадийно развивающееся объемное тело с определенным структурно-вещественным наполнением [48–52]. Для характеристики максимальной ширины этой зоны предложено понятие «область активного динамического влияния разлома» (ОАДВР) [48, 49].

По определению ОАДВР представляет собой трехмерную область, в которой проявляются остаточные разрывные деформации, связанные с формированием разлома и последующими подвижками по нему (рис. 2). Наблюдения за формированием зон крупных разломов разных морфолого-генетических типов в упруговязкопластичных моделях литосферы показали, что ОАДВР достигает максимальной ширины (M) к концу первой стадии развития разломов [44, 50, 51], описываемой уравнением:

$$M = C_1 \cdot H + C_2 \cdot \lg \eta + C_3 \cdot \lg V - K, \quad (1)$$

где H , η , V – толщина модели, ее вязкость и скорость нагружения соответственно; C_1 , C_2 , C_3 , K – коэффициенты, определяемые морфолого-генетическим типом разломной зоны.

Параметр M отражает максимальную ширину ОАДВР. В ходе дальнейшей эволюции зоны разлома процесс разрывообразования локализуется во все более узкой области. Для характеристики этой области введено понятие «область активного структурообразования разлома» (ОАСР) (рис. 2) и предложено уравнение оценки ее ширины M_a [53]:

$$M_a = 0.9525 H - 0.02701 A - 0.0758 \lg \eta + 0.4161 \lg V + 4.4924, \quad (2)$$

где A – амплитуда смещения крыльев зоны разлома.

Из уравнения (2) следует, что параметр M_a в основном определяется толщиной разрушаемого слоя (H) и амплитудой смещения крыльев разлома (A), при незначительном влиянии его вязкости (η) и скорости деформирования (V). При этом параметры H и A выполняют разные функции. Если первый из них определяет максимально возможное значение M_a , в пределе равное M , то второй контролирует его последующие изменения по мере развития

деформационного процесса. ОАСР достигает минимальной величины, когда сформируется один крупный магистральный разрыв, а все другие разрывы меньшего масштабного ранга в зоне разлома перейдут в пассивное состояние (рис. 3 А).

В случае прекращения смещений на каком-то участке магистрального разрыва в условиях продолжающегося смещения крыльев разломной зоны, т.е. в случае появления на нем замкнутого пассивного сегмента, в пределах последнего начинается рост напряжений с соответствующим реверсивным расширением ОАСР за счет активизации ранее пассивных разрывов (рис. 3 Б). В случае большой протяженности замкнутого сегмента пределом такого расширения является ширина ОАДВР.

Вторая закономерность связана с сегментным механизмом активности разрывов, составляющих внутреннюю структуру зоны разлома [44–46]. Как показано в цитируемых работах, активные разрывы в зоне разлома всегда представлены чередующимися по их простиранию активными и пассивными сегментами. Наглядный пример сегментной активности разрывов приведен на рис. 4. На нем представлены схемы

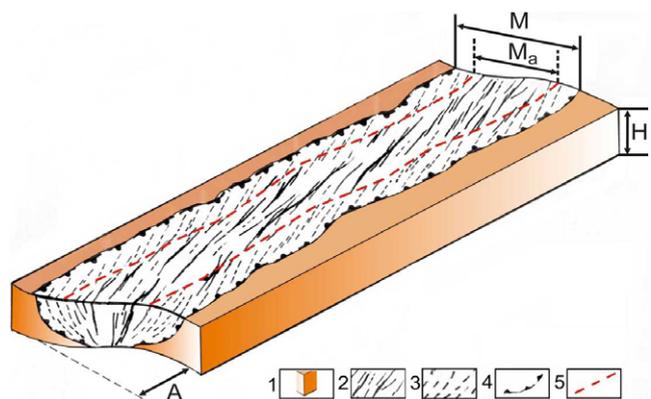


Рис. 2. Иллюстративная схема области активного динамического влияния и области активного структурообразования сдвиговой зоны в модели. H – толщина модели; A – амплитуда смещения крыльев зоны разлома; M – ширина ОАДВР; M_a – ширина ОАСР. 1 – модель, 2 – активные разрывы, 3 – пассивные разрывы, 4 – граница ОАДВР, 5 – граница ОАСР..

Fig. 2. Illustrative scheme of the Active Dynamic Influence Area (ADIA) and the Active Structure Formation Area (ASFA) of the shear zone in the model.

H is the thickness of the model; A is the displacement amplitude of the wings of the shear zone; M is the width of the ADIA; M_a is the width of the ASFA. (1) model, (2) active fractures, (3) passive fractures, (4) the boundary of the ADIA, (5) the boundary of the ASFA.

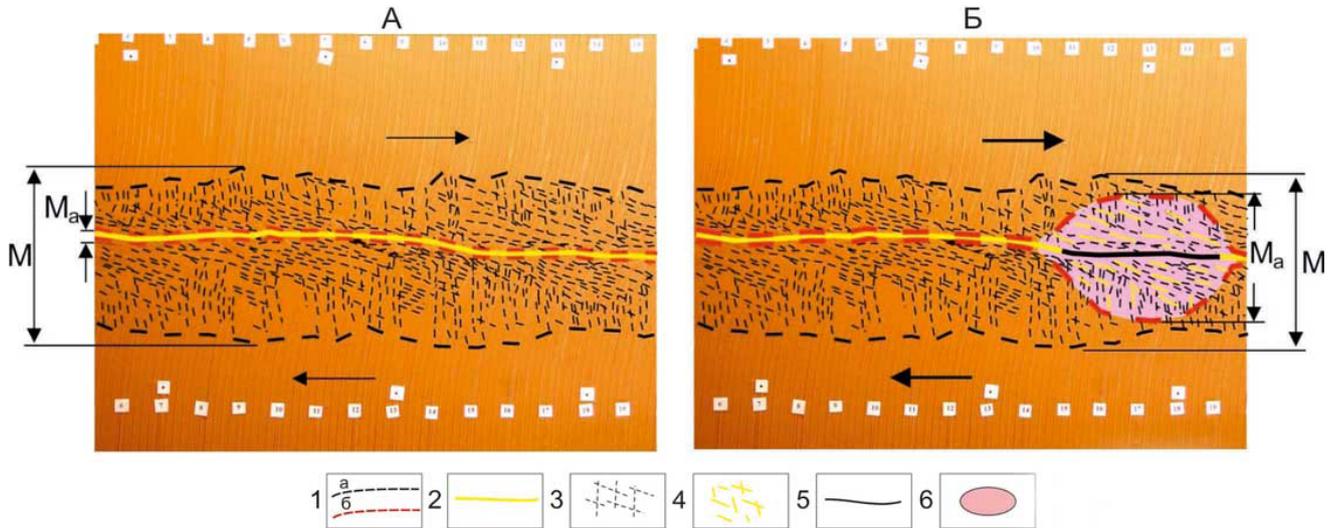


Рис. 3. Фрагмент области сдвиговой зоны в модели с полностью активным (А) и частично замкнутым (Б) магистральным разрывом. 1 – границы ОАДВР (а) и ОАСР (б) сдвиговой зоны; 2 – активный магистральный разрыв; 3 – пассивные разрывы; 4 – активные разрывы; 5 – замкнутый участок магистрального разрыва; 6 – вовлеченная в активизацию область в окрестностях замкнутого участка магистрального разрыва.

Fig. 3. Fragment of the shear zone area in a model with a fully active (A) and partially closed (B) main fracture. (1) boundaries of the ADIA (a) and ASFA (б) of the shear zone; (2) active main fracture; (3) passive fractures; (4) active fractures; (5) closed section of the main fracture; (6) the area involved in the activation in the vicinity of the closed section of the main fracture.

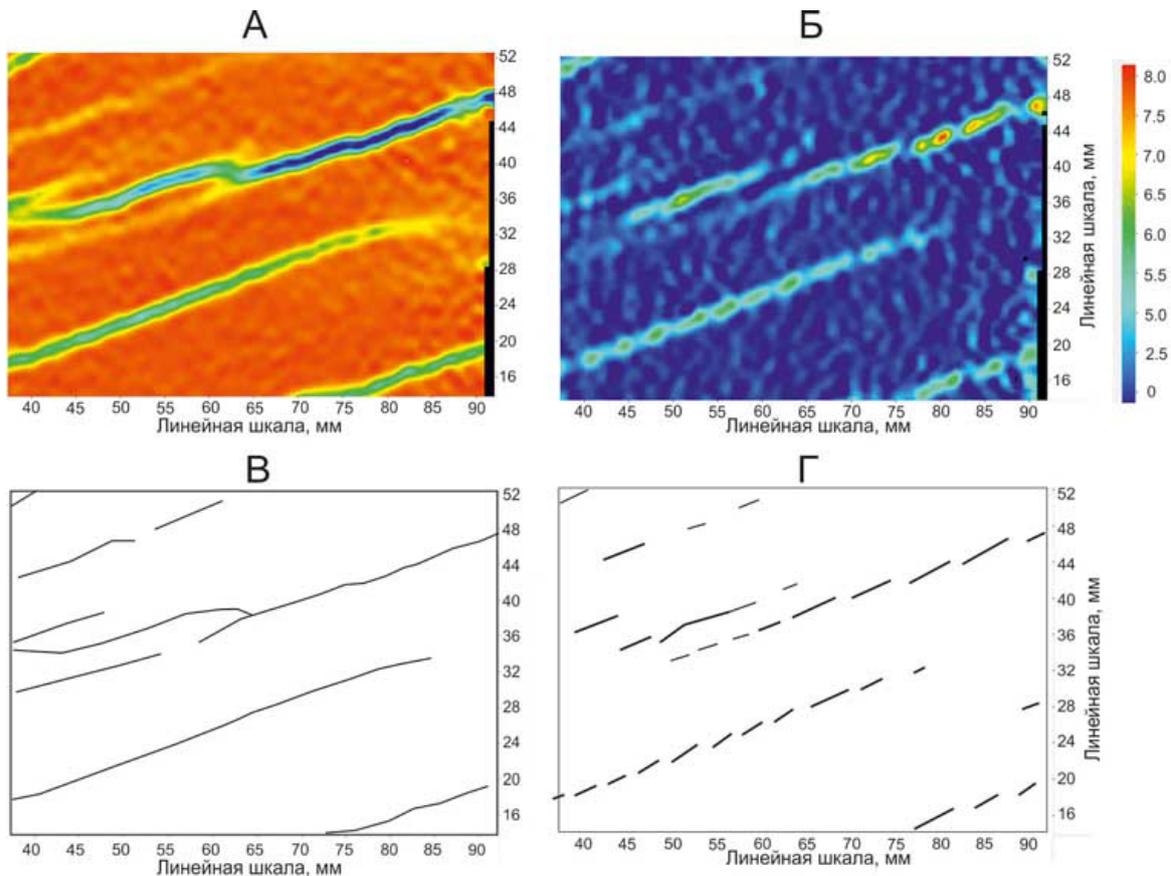


Рис. 4. Схемы распределения деформации сдвига, полученные при интегральном (А) и дифференциальном (Б) сценарии расчета и составленные по ним схемы активных разрывов (В) и их активных сегментов (Г).

Fig. 4. Schemes of the shear strain distribution obtained under the integral (A) and differential (B) calculation scenarios and schemes of active fractures (В) and their active segments (Г) compiled on the basis of schemes.

распределения деформаций сдвига на фрагменте сдвиговой зоны в модели, полученные методом корреляции цифровых изображений [47]. Рис. 4 А демонстрирует результаты расчета деформации по интегральному сценарию и отражает суммарный деформационный эффект, накопленный на момент фотофиксации моделируемого процесса. В отличие от него, расчет по дифференциальному сценарию (рис. 4 Б) показывает приращение деформации за контрольный интервал времени. На нем отчетливо прослеживается сегментная активность протяженных разрывов.

Наблюдения за эволюцией сегментной структуры разрывов во времени показали, что они мобильны по простиранию разрывов, и их количество и средняя длина определяются уровнем накопленных в зоне разлома

напряжений. Наглядно направленность эволюции сегментной структуры прослеживается при периодической «сейсмогенной» активизации единичного разрыва в зоне разлома (рис. 5) [45]. Из представленных схем видно, что после первой активизации (рис. 5 А, А') напряжения на плоскости разрыва снижаются и смещения на нем происходят фрагментарно на нескольких относительно крупных сегментах (рис. 5 Б, Б'). В последующих временных интервалах на фоне возрастающих напряжений крупные сегменты дробятся на серию более мелких, что выражается в увеличении их количества с сокращением их средней и суммарной длины (рис. 5 В'–Ж', рис. 6). Перед очередной полной активизацией, когда напряжение на плоскости разрыва достигает значений, сопоставимых с ее прочностью, процесс

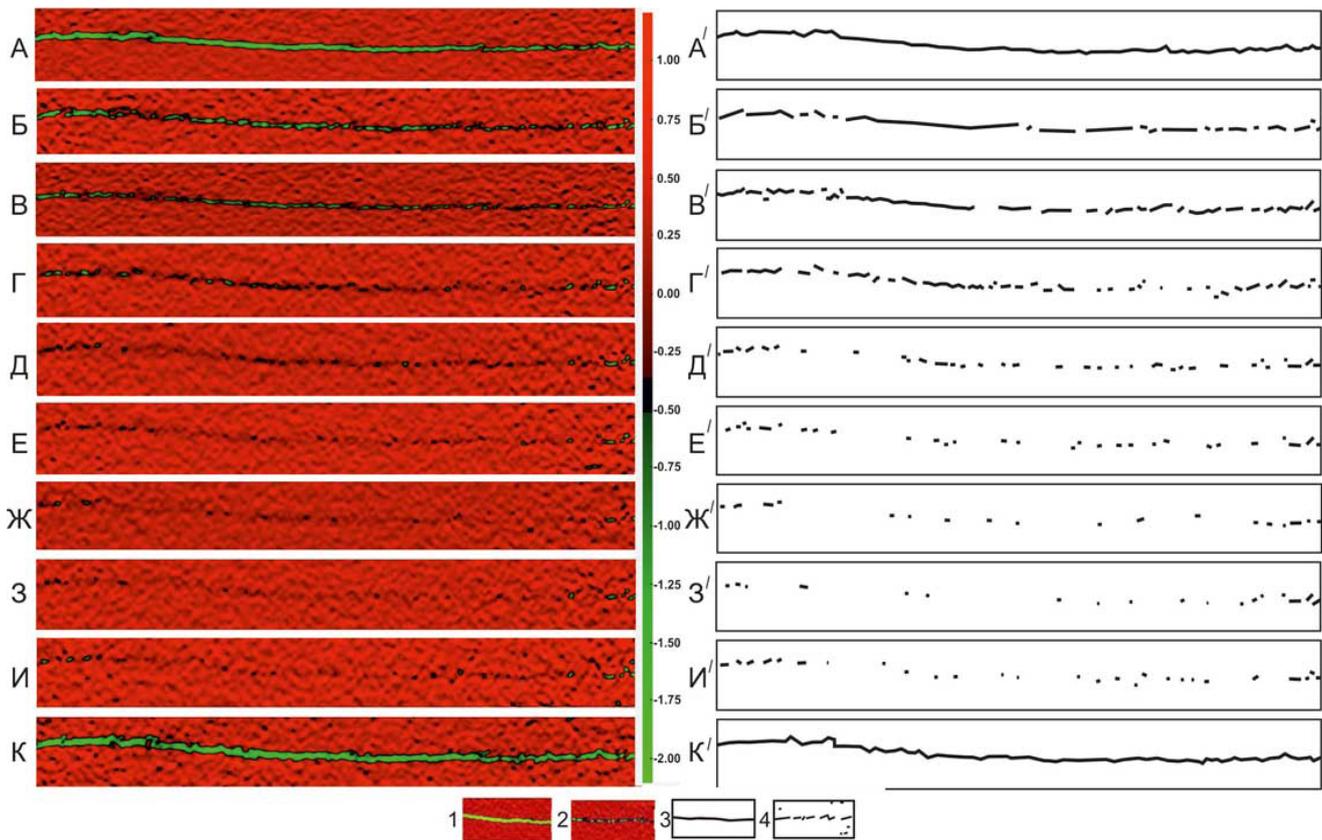


Рис. 5. Эволюция структуры активных сегментов разрыва в модели между двумя его полными активизациями по результатам обработки методом корреляции цифровых изображений (слева) и их структурные схемы (справа). 1 – полностью активизированный и 2 – сегментарно активный разрыв на схемах распределения деформации сдвига, полученных методом корреляции цифровых изображений; 3 – полностью активизированный и 4 – сегментарно активный разрыв на структурных схемах.

Fig. 5. Evolution of the structure of active fracture segments in the model between its two full activations according to the results of processing by the method of digital image correlation (on the left) and their structural schemes (on the right). (1) fully activated and (2) segmentally active fracture in the shear strain distribution schemes obtained by digital image correlation; (3) fully activated and (4) segmentally active fracture in structural schemes.

сегментации стабилизируется (рис. 5 З, З'), затем приобретает обратную направленность за счет образования новых сегментов и их выборочного разрастания, с изменением перечисленных выше параметров в противоположную сторону (рис. 5 И, И', рис. 6).

При подготовке активизации разрыва в деформацию вовлекается широкая область в

его крыльях. На рис. 7 представлен фрагмент рис. 5 К, отчетливо показывающий наличие многочисленных сопряженных пластических микросдвигов двух простираний в этой области, проявленных в виде локализованных линейных максимумов деформации сдвига. Сопоставление одноименных параметров сегментов разрыва и микросдвигов показывает, что их вариации совпадают по количеству (рис. 6 А) и отличаются по суммарной и средней длине (рис. 6 Б, В). Это указывает на то, что развитие деформационных процессов на самом разрыве и в окружающей его области протекает по-разному.

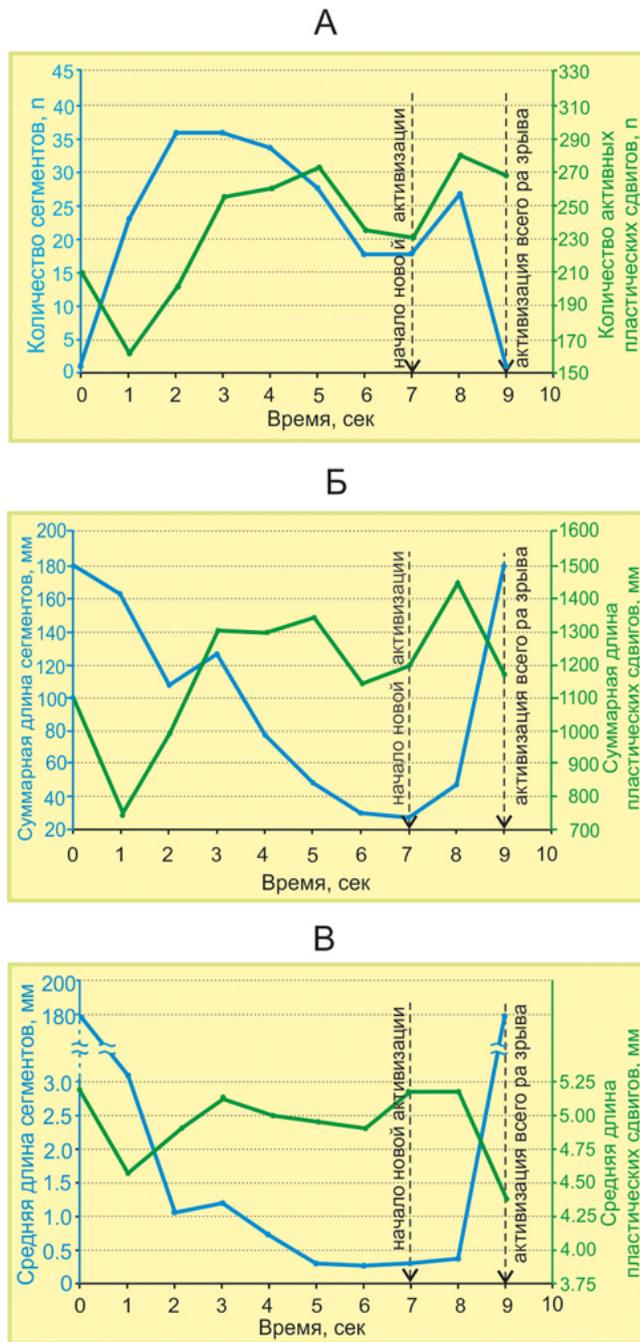


Рис. 6. Изменение параметров активных сегментов во времени: количества (А), суммарной (Б) и средней длины (В).

Fig. 6. Change in the parameters of active segments over time: number (А), total length (Б) and average length (В).

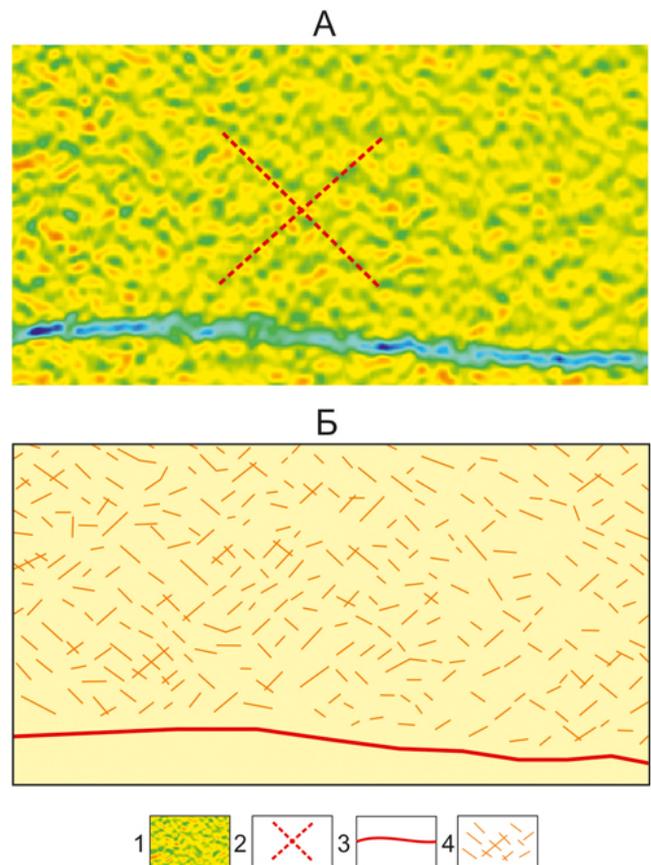


Рис. 7. Пластические микросдвиги в крыле разрыва в модели по результатам обработки методом корреляции цифровых изображений (А) и их структурная схема (Б). 1 – полосовидные максимумы значений деформации сдвига, соответствующие пластическим микросдвигам; 2 – два основных простирания микросдвигов; 3 – разрыв и 4 – пластические микросдвиги на структурной схеме.

Fig. 7. Plastic microshears in the wing of the fracture in the model based on the results of processing by the method of digital image correlation (А) and their structural scheme (Б). (1) ribbon-like maxima of shear strain values corresponding to plastic microshears; (2) two main strikes of microshears; (3) fracture, and (4) plastic microshears on the structural scheme.

3. Тектонофизическая модель очага тектонического землетрясения

В основу ТМОТЗ положены описанные выше закономерности структурно-динамического развития зоны разлома, а также синергетические представления о кооперативном поведении элементов открытой системы в критическом, сильно неравновесном состоянии. Суть модели, схематично представленной на рис. 8, сводится к следующему.

Формирование очага землетрясения начинается с появления замкнутого участка на активном магистральном разрыве разломной зоны. Его постепенный переход в пассивное состояние осуществляется в соответствии с выше описанным экспериментальным сценарием сегментации (рис. 5) – от нескольких крупных активных сегментов к многочисленным мелким с последующим их вырождением, сменяющимся образованием новых сегментов при возникновении на этом замкнутом участке напряжений, достаточных для его сейсмогенной активизации.

Рост напряжений на замкнутом участке разрыва сопровождается их ростом в окружающей его области (очаговая область) с активизацией в ее пределах преимущественно крупных, ранее пассивных разрывов. Последние, по мере дальнейшего роста напряжений, также подвержены направленной сегментации, как и основной разрыв (рис. 5), однако деформационный процесс в их пределах, как следует из графиков рис. 6, отличается от такового на разрыве (очаге готовящегося землетрясения).

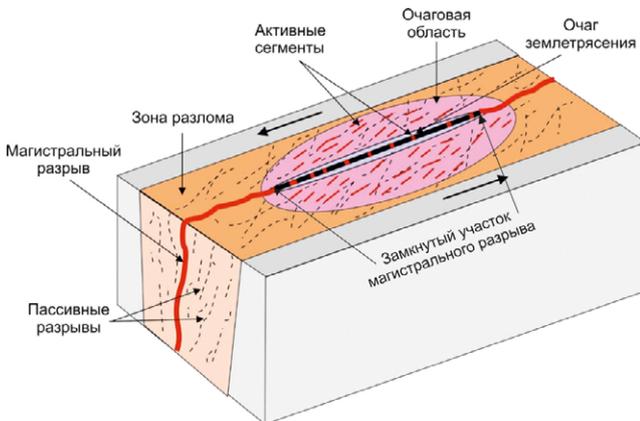


Рис. 8. Тектонофизическая модель очага землетрясения.
Fig. 8. Tectonophysical model of the earthquake focus.

В преддверии активизации, в метастабильную стадию деформационного процесса [43], замкнутый участок представлен совокупностью активных сегментов с разнонаправленными, треморподобными смещениями их крыльев (рис. 9 А). Деформационная динамика сегментов меняется за счет их самоорганизации при переходе деформационного процесса в метанестабильную стадию. Результатом такой самоорганизации является наличие кооперативного согласованного смещения на всех сегментах (рис. 9 Б, В). Периодическая смена направления треморподобных смещений на сегментах порождает автоволновой деформационный процесс в очаге землетрясения в его предсейсмогенном состоянии. Именно этот автоволновой процесс является его устойчиво проявляющимся краткосрочным предвестником.

Из отмеченного выше различия в протекании деформационных процессов в очаге зем-

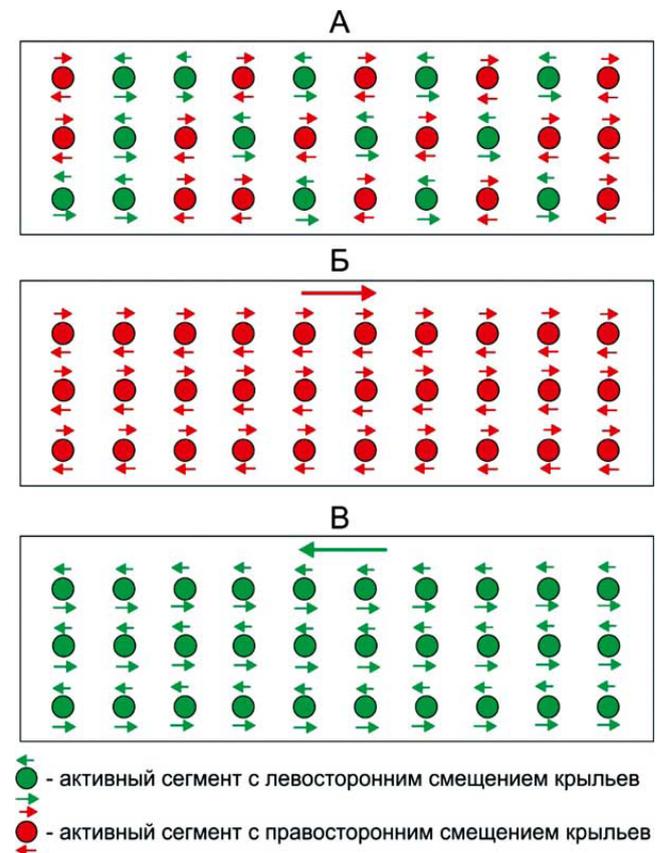


Рис. 9. Модельная схема смещений по активизированным сегментам разрыва до (А) и после (Б, В) их самоорганизации.

Fig. 9. Model diagram of displacements along the activated segments of the fracture before (A) and after (Б, В) of their self-organization.

летрясения и в его очаговой области следует вывод о том, что последняя может быть только источником долго- и среднесрочных предвестников, что следует учитывать при прогнозных построениях.

4. Верификация тектонофизической модели очага тектонического землетрясения

Предложенная ТМОТЗ находит подтверждение в результатах обработки данных деформационного мониторинга пород и сейсмичности перед последними сильными землетрясениями в Южном Прибайкалье, а также перед ледовыми ударами в ледовом покрове оз. Байкал. Методические вопросы мониторинга, методы обработки полученных данных и результаты детально описаны в серии авторских публикаций [45, 54–58].

Основным подтверждением адекватности ТМОТЗ природному процессу подготовки землетрясения является наличие предшествующей ему деформационной самоорганизации и порождаемого ею низкочастотного тремор-подобного автоволнового процесса. В цитируемых работах показано, что такая самоорганизация имела место как перед землетрясениями (Култукским, 2008 г., Быстринским, 2020 г. и Кударинским, 2020 г.), так и перед ледовыми ударами [45, 54].

Так, по результатам обработки сейсмологических данных с разных широкополосных региональных сейсмостанций Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС было выявлено возникновение низкочастотных автоволновых колебаний (0.1–0.01 Гц) за 14 ч до Кударинского землетрясения. Поляризационный анализ показал, что источником этих автоколебаний являлся очаг землетрясения [58]. Отметим, что при анализе микросейсмических шумов (МСШ) перед землетрясением нами анализировались также данные метеостанций, расположенных вблизи упомянутых сейсмических станций. Согласно проведенному анализу, влиянием метеофакторов на амплитудно-частотный состав МСШ в выбранные промежутки времени можно пренебречь.

В качестве подтверждения выявленного авторами эффекта приведем результаты неза-

висимого исследования, выполненного коллегами из Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН для поиска предвестников землетрясений Байкальского региона методом машинного обучения. Было выбрано 40 событий на расстояниях до 150 км от широкополосной сейсмической станции Куяда в разные сезоны. По их результатам, для 90 % близких событий за 10–12 ч до основного толчка также наблюдается увеличение уровня МСШ в указанном выше диапазоне частот по сравнению со спокойным фоном [59].

Дополнительным аргументом могут быть аналогичные результаты, полученные для ледовых ударов. Они также показывают наличие перед каждым ледовым ударом предшествующих ему низкочастотных автоволновых колебаний с частотой 0.1 Гц, источником которых является станова трещина, генерирующая этот ледовый удар [57].

Заключение

На основе результатов физического моделирования процессов формирования зон разломов выявлены общие закономерности их структурно динамического развития. Эти закономерности положены в основу авторской тектонофизической модели очага тектонического землетрясения, с вытекающим из нее его предвестником. В качестве такого предвестника выступает деформационная самоорганизация активных сегментов в очаге готовящегося землетрясения. Показано, что этот процесс проявляется в виде низкочастотных автоволновых колебаний непосредственно перед сейсмическим событием во временном интервале от первых дней до первых часов, что позволяет рассматривать его как краткосрочный. Он поддается диагностике по данным деформационного и сейсмического мониторинга.

Список литературы

1. Гамбурцев Г.А. 1955. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений. *Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР*, 1: 7–14.
2. Певнев А.К. 2015. Прогноз землетрясений возможен (о месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 1. Г.А. Гамбурцев и возможность прогнозирования землетрясений. *Пространство и время*, 4 (22): 195–201.

3. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997**. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275(5306): 1616–1619. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
4. Wyss M. et al. **1997**. Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278: 487–488. <https://doi.org/10.1126/science.278.5337.487>
5. Богомолов Л.М., Сычева Н.А. **2022**. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы. *Геосистемы переходных зон*, 6(3): 145–182. <https://doi.org/10.30730/grtz.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrt>
6. Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. **2019**. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? *Вестн. Московского ун-та. Серия 4, Геология*, 3: 3–12. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-3-3-12>
7. Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. **2009**. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>
8. Кондепуди Д., Пригожин И. **2002**. *Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур*. М.: Мир, 460 с. (Пер. с англ.).
9. Хакен Г. **1980**. *Синергетика*. М.: Мир, 404 с.
10. Mandelbrot B.B. **1982**. *The fractal geometry nature*. N. Y.: Freeman, 480 p.
11. Шустер Г. **1988**. *Детерминированный хаос. Введение*. М.: Мир, 240 с
12. *Нелинейная геодинамика*. **1994**. Под. ред. Ю.М. Пушаровского. М.: Наука, 192 с.
13. Пушаровский Ю.М. **1998**. Геологическое выражение нелинейных геодинамических процессов. *Геотектоника*, 1: 3–14.
14. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г. Писаренко В.Ф. **1982**. О свойстве дискретности горных пород. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 12: 3–18.
15. Crampin S., Gao Y. **2013**. The new geophysics. *Terra Nova*, 25(3): 173–180. <https://doi.org/10.1111/ter.12030>
16. Kagan Y.Y. **1994**. Observational evidence for earthquakes as nonlinear dynamic process. *Physica D*, 77(4): 160–192.
17. Bak P., Tang C. **1989**. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research*, 94(B11): 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15635>
18. Ito K., Matsuzaki M. **1990**. Earthquakes as self-organized critical phenomena. *Journal of Geophysical Research*, 95(B5): 6853–6860. <https://doi.org/10.1029/JB095iB05p06853>
19. Olami Z., Feder S., Christensen K. **1992**. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. *Physical Review Letters*, 68(8): 1244–1247. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.68.1244>
20. Sornette D. **2000**. *Critical phenomena in natural sciences. Chaos, fractals, self-organization and disorder: Concepts and tools*. Heidelberg: Springer-Verlag, 423 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04174-1> (Springer Ser. Synerg.).
21. Zöller G., Hainzl S., Kurths J. **2001**. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106: 2167–2176. <https://doi.org/10.1029/2000jb900379>
22. Литовченко И.Н. **2021**. *О типах очагов землетрясений, их модели и формирование*. URL: <http://sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st4977.pdf>
23. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. **2014**. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра*, 3: 44–62.
24. Гольдин С.В. **2005**. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения. *Физическая мезомеханика*, 8(1): 5–14. EDN: NQTWHN
25. Гзовский М.В. **1957**. Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности. *Изв. АН СССР. Сер. геофизическая*, 2: 141–160.
26. Горшков Г.П. **1984**. *Региональная сейсмотектоника территории юга СССР (Альпийский пояс)*. М.: Наука, 272 с.
27. Тулиани Л.И. **1999**. *Сейсмичность и сейсмическая опасность: на основе термодинамических и реологических параметров тектоносферы*. М.: Научный мир, 216 с.
28. Ребецкий Ю.Л. **2007**. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода. *Геофизический журнал*, 29(4): 92–110.
29. Шерман С.И. **2014**. *Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция*. Новосибирск: Гео, 359 с.
30. Bath M., Duda S.J. **1964**. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities. *Annals of Geophysics*, 17(3): 353–368. <https://doi.org/10.4401/ag-5213>
31. Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я. **2003**. Флуктуация геофизических полей и прогноз землетрясений. *Физика Земли*, 4: 3–20.
32. Кочарян Г.Г. **2010**. Разломная зона как нелинейная механическая система. *Физическая мезомеханика*, 13 (Спец. вып.): 5–17. EDN: NQXHWN
33. Кузнецов О.Л. **1981**. Нелинейная геофизика. В кн.: *Вопросы нелинейной геофизики*. М.: ВНИИЯГТ, с. 3–14.
34. Кузнецов О.Л. (ред.). **1981**. *Вопросы нелинейной геофизики*. М.: ВНИИЯГТ, 187 с.

35. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. **2011**. Некоторые автомодельные закономерности развития поврежденности при квазихрупком разрушении твердых тел. *Вычислительная механика сплошных сред*, 4(1): 90–100.
36. Родкин М.В. **2011**. Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных подсистем. *Физика Земли*, 11: 18–26. EDN: OJGOOR
37. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 269 с.
38. Тюпкин Ю.С. **2004**. Формирование потенциального очага землетрясения: аналогия с фазовым переходом. *Вычислительная сейсмология*, 35: 296–311.
39. Brace W.F., Byerlee J.D. **1966**. Stick-slip as a mechanism for earthquake. *Science*, 153: 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
40. Goebel T.H.W., Becker T.W., Schorlemmer D., Stanchits S., Sammis C., Rybacki E., Dresen G. **2012**. Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics. *Journal of Geophysical Research*, 117(B03310). <https://doi.org/10.1029/2011JB008763>
41. Goebel T.H.W., Candela T., Sammis C.G., Becker T.W., Dresen G., Schorlemmer D. **2014**. Seismic event distributions and off-fault damage during frictional sliding of saw-cut surfaces with pre-defined roughness. *Geophysical Journal International*, 196: 612–625. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt401>
42. Jin M.J., Sherman S.I., Guo Y.S. **2012**. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault. *Science China Earth Sciences*, 55: 869–881. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4423-2>
43. Дзинь М., Яншуань Г., Шерман С.И. **2014**. Ускоренный синергизм вдоль разлома: возможный индикатор неизбежного крупного землетрясения. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(2): 387–399.
44. Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. **2014**. Основные закономерности разломообразования и их прикладные следствия: по результатам физического моделирования. *Геодинамика и тектонофизика*, 4: 823–861.
45. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Черемных А.В., Каримова А.А. **2018**. Экспериментальное исследование периодической активизации разлома в сейсмической зоне. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(3): 653–670. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0366>
46. Каримова А.А., Борняков С.А. **2020**. Эволюция разрывной структуры сдвиговой зоны как периодический процесс (по результатам физического моделирования). *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*, 33: 44–52. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44>
47. Sutton M.A., Ortu J.J., Schreier H.W. **2009**. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications*. Springer, 316 p.
48. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. **1983**. *Области динамического влияния разломов (результаты моделирования)*. Новосибирск: Наука, 112 с.
49. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. **1991**. *Разломообразование в литосфере: зоны сдвига*. Новосибирск: Наука, 261 с.
50. Семинский К.Ж. **2003**. *Внутренняя структура континентальных разрывных зон: тектонофизический аспект*. Новосибирск: ГЕО, 244 с.
51. Ребецкий Ю.Л. **2007**. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминистского подхода. *Геофизический журнал*, 29(4): 92–110. <https://disk.yandex.ru/d/SMrTgPXpqS744Q>
52. Ребецкий Ю.Л. **2007**. Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения. *Геофизический журнал*, 29(6): 92–110.
53. Борняков С.А. **1990**. Количественный анализ параметров разномасштабных сдвигов. *Геология и геофизика*, 10: 34–42.
54. Борняков С.А., Встовский Г.В. **2010**. Первый опыт сейсмодинамического мониторинга Байкальской рифтовой зоны (на примере Южно-Байкальского землетрясения 27 августа 2008 г.). *Доклады РАН*, 431(4): 537–541. EDN: LOKDND
55. Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Встовский Г.В., Синцов А.Е., Салко Д.В. **2022**. Новый подход к прогнозу сильных землетрясений в Южном Прибайкалье на основе данных мониторинга деформаций горных пород: методология и результаты. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(2): 0588. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0588>
56. Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. **2021**. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw = 5.4): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в метанестабильное состояние. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 498(1): 86–90. <https://doi.org/10.31857/S2686739721050042>
57. Борняков С.А., Добрынина А.А., Шагун А.Н., Саньков В.А., Салко Д.В., Мирошниченко А.И., Встовский Г.В., Синцов А.Е. **2023**. О подобии деформационных процессов перед ледовыми ударами и тектоническими землетрясениями. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 509(2): 243–249 <https://doi.org/10.31857/S2686739722602903>

58. Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., Король С.А., Саньков А.В. **2023**. Аномалии микро-сейсмических шумов в связи с Кударинским землетрясением 9 декабря 2020 г. с $M_w = 5.6$ в Байкальской впадине. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 509(1): 74–80. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602733>
59. Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., Kim M. **2024**. Application of machine learning methods to the problem of identifying earthquake precursors in the Baikal Region. In: *Marchuk Scientific Readings: Theses of the International Conference, October 7–11, 2024*. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, p. 121.
- ## References
- Gamburtsev G.A. **1955**. [Status and prospects of works in the field of earthquake forecasting]. *Bull. Soveta po seysmologii AN SSSR*, 1: 7–14. (In Russ.).
 - Pevnev A.K. **2015**. Earthquake forecasting is possible (on the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 1. Grigory A. Gamburtsev and possibility of earthquake prediction. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*, 4(22): 195–201. (In Russ.).
 - Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997**. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275(5306): 1616–1619. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
 - Wyss M. et al. **1997**. Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278: 487–488. <https://doi.org/10.1126/science.278.5337.487>
 - Bogomolov L.M., Sycheva N.A. **2022**. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(3): 145–182. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182>
 - Koronovsky N.V., Zakharov V.S., Naimark A.A. **2019**. The short-term forecast of earthquakes: reality, scientific perspective or the project-phantom? *Moscow University Bulletin. Series 4, Geology*, 3: 3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-3-3-12>
 - Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. **2009**. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>
 - Kondepudi D., Prigogin I. **1998**. *Modern thermodynamics: From heat engines to dissipative structures*. Chichester, UK: Wiley, 486p.
 - Haken H. **1980**. *Synergetics*. Moscow: Mir, 404 p. (In Russ.).
 - Mandelbrot B.B. **1982**. *The fractal geometry nature*. N.Y.: Freeman, 480 p.
 - Shuster G. **1988**. *Deterministic chaos. An introduction*. Weinheim: VCH, 270 p.
 - Pushcharovsky Yu.M. (Ed.) **1994**. *Nonlinear geodynamics*. Moscow: Nauka, 192 p.
 - Pushcharovsky Yu.M. **1998**. Geologic expression of nonlinear geodynamic processes. *Geotectonics*, 32 (1): 3–14. (In Russ.)
 - Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. **1982**. On the discrete property of rocks. *Izvestia AN SSSR, Physics of the Earth*, 12: 3–18. (In Russ.).
 - Crampin S., Gao Y. **2013**. The new geophysics. *Terra Nova*, 25(3): 173–180. <https://doi.org/10.1111/ter.12030>
 - Kagan Y.Y. **1994**. Observational evidence for earthquakes as nonlinear dynamic process. *Physica D*, 77(4): 160–192.
 - Bak P., Tang C. **1989**. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research*, 94(B11): 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15635>
 - Ito K., Matsuzaki M. **1990**. Earthquakes as self-organized critical phenomena. *Journal of Geophysical Research*, 95(B5): 6853–6860. <https://doi.org/10.1029/JB095iB05p06853>
 - Olami Z., Feder S., Christensen K. **1992**. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. *Physical Review Letters*, 68(8): 1244–1247. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.68.1244>
 - Sornette D. **2000**. *Critical phenomena in natural sciences. Chaos, fractals, self-organization and disorder: Concepts and tools*. Heidelberg: Springer-Verlag, 423 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04174-1> (Springer Ser. Synerg.).
 - Zöller G., Hainzl S., Kurths J. **2001**. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106: 2167–2176. <https://doi.org/10.1029/2000jb900379>
 - Litovchenko I.N. **2021**. *On the types of earthquake sources, their models and formation*. (In Russ.). URL: <http://www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st4977.pdf>
 - Panteleev I.A., Naimark O.B. **2014**. Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes. *Perm Federal Research Center J.*, 3: 44–62. (In Russ.). EDN: TDURFP
 - Goldin S.V. **2005**. Macro- and mesostructures of the earthquake focal region. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 8(1): 5–14. (In Russ.).
 - Gzovsky M.V. **1957**. [Tectonophysical substantiation of geological criteria of seismicity]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geofiz.*, 2: 141–160. (In Russ.).
 - Gorshkov G.P. **1984**. *Regional seismotectonics of the southern territory of the USSR. Alpine Belt*. Moscow: Nauka, 272 p. (In Russ.).
 - Tuliani L.I. **1999**. [Seismicity and seismic hazard: based on thermodynamic and rheological parameters of the tectonosphere]. Moscow: Scientific World, 216 p. (In Russ.).

28. Rebetsky Y.L. **2007**. Problems of earthquake prediction theory: Analysis of fundamentals from the perspective of a deterministic approach. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(4): 92–110. (In Russ.).
29. Sherman S.I. **2014**. *Seismic process and the forecast of earthquakes: tectonophysical conception*. Novosibirsk: Geo, 359 p. (In Russ.).
30. Bath M., Duda S.J. **1964**. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities. *Annals of Geophysics*, 17(3): 353–368. <https://doi.org/10.4401/ag-5213>
31. Deshcherevsky A.V., Lukk A.A., Sidorin A.Ya. **2003**. Fluctuations of geophysical fields and earthquake prediction. *Physics of the Earth*, 4: 3–20. (In Russ.).
32. Kocharyan G.G. **2010**. Fault zone as a nonlinear mechanical system. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 13 (Spec. Iss.): 5–17. (In Russ.). EDN: NQXHWN
33. Kuznetsov O.L. **1981**. Nonlinear Geophysics. In: [*Problems of nonlinear geophysics*]. Moscow: VNIYaGG, p. 3–14. (In Russ.).
34. Kuznetsov O.L. (Ed.) **1981**. [*Problems of nonlinear geophysics*]. Moscow: VNIYaGG, 187 p. (In Russ.).
35. Pantelev I.A., Plekhov O.A., Naymark O.B. **2011**. Selfsimilarity mechanisms of damage growth in solids experiencing quasi-brittle fracture. *Computational Continuum Mechanics*, 4(1): 90–100. (In Russ.).
36. Rodkin M.V. **2011**. Alternative to soc concept-model of seismic regime as a set of episodes of random avalanche-like releases occurring on a set of metastable subsystems. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 47(11): 966–973.
37. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. *Earthquake physics and precursors*. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ.).
38. Tyupkin Yu.S. **2004**. Formation of potential earthquake focus: an analogy with phase transition. *Computational Seismology*, 35: 296–311. (In Russ.).
39. Brace W.F., Byerlee J.D. **1966**. Stick-slip as a mechanism for earthquake. *Science*, 153: 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
40. Goebel T.H.W., Becker T.W., Schorlemmer D., Stanchits S., Sammis C., Rybacki E., Dresen G. **2012**. Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics. *Journal of Geophysical Research*, 117(B3). <https://doi.org/10.1029/2011JB008763>
41. Goebel T.H.W., Candela T., Sammis C.G., Becker T.W., Dresen G., Schorlemmer D. **2014**. Seismic event distributions and off-fault damage during frictional sliding of saw-cut surfaces with pre-defined roughness. *Geophysical Journal International*, 196: 612–625. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt401>
42. Jin M.J., Sherman S.I., Guo Y.S. **2012**. Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault. *Science China Earth Sciences*, 55: 869–881. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4423-2>
43. Jin M., Yanshuang G., Sherman S.I. **2014**. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2): 387–399. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0134>
44. Borneyakov S.A., Seminsky K.Zh., Buddo V.Yu., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., Tarasova A.A. **2014**. Main regularities of faulting in lithosphere and their application (based on physical modelling results). *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(4): 823–861. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0159>
45. Borneyakov S.A., Pantelev I.A., Cheremnykh A.V., Karimova A.A. **2018**. Physical modeling experiments to study periodic activation of faults in seismic zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(3): 653–670. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2018-9-3-0366>
46. Karimova A.A., Borneyakov S.A. **2020**. The evolution of the discontinuous structure of the shear zone as a periodic process (based on physical modeling). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 33: 44–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44>
47. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W. **2009**. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications*. Springer, 316 p.
48. Sherman S.I., Borneyakov S.A., Buddo V.Yu. **1983**. [*Areas of dynamic influence of faults (modelling results)*]. Novosibirsk: Nauka, 112 p. (In Russ.).
49. Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Borneyakov S.A., et al. **1991**. *Faulting in the lithosphere. shear zones*. Novosibirsk: Nauka, 261 p. (In Russ.).
50. Seminsky K.Zh. **2003**. *The internal structure of continental fault zones: tectonophysical aspect*. Novosibirsk: GEO, 244 p. (In Russ.).
51. Rebetsky Yu.L. **2007**. State and problems of earthquake forecast theory. Analysis of the foundations from the standpoint of a deterministic approach. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(4): 92–110. (In Russ.). <https://disk.yandex.ru/d/SMrTgPXrqS744Q> (дата обращения 19.11.2024).
52. Rebetsky Y.L. **2007**. New data on natural stresses in the preparation area of a strong earthquake. The model of earthquake source. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(6): 92–110. (In Russ.).
53. Borneyakov S.A. **1990**. Quantitative analysis of parameters of shear faults varying in scale. *Geologiya i geofizika*, 10: 34–42. (In Russ.).
54. Borneyakov S.A., Vstovskii G.V. **2010**. The first experiment of seismodeformational monitoring of the Baikal rift zone: example of the August 27, 2008, South-Baikal earthquake. *Doklady Earth Sciences*, 431(2): 469–473.

55. Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Vstovsky G.V., Sintsov A.E., Salko D.V. **2022**. New approach to strong earthquakes prediction in the Southern Baikal region on the basis of rock deformation monitoring data: methodology and results. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(2): 0588. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0588>
56. Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Seminsky K.Zh., Sankov V.A., Radziminovich N.A., Salko D.V., Shagun A.N. **2021**. The Bystrinskii earthquake in the Southern Baikal Region (Sep. 21, 2020, Mw = 5.4): General characteristics, basic parameters, and deformation signs of the transition of the focus to the meta-unstable state. *Doklady Earth Sciences*, 498(1): 427–431. <https://doi.org/10.1134/s1028334x21050044>
57. Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Shagun A.N., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Vstovsky G.V., Sintsov A.E. **2023**. On similarities between deformation processes preceding ice shocks and tectonic earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 508: 91–96. <https://doi.org/10.1134/s1028334x22602097>
58. Dobrynina A.A., Sankov V.A., Bornyakov S.A., Korol S.A., Sankov A.V. **2023**. Anomalous seismic noises from the December 9, 2020 Mw = 5.6 Kudara earthquake in the Baikal basin. *Doklady Earth Sciences*, 508: 23–29. <https://doi.org/10.1134/s1028334x22601912>
59. Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., Kim M. **2024**. Application of machine learning methods to the problem of identifying earthquake precursors in the Baikal Region. In: *Marchuk Scientific Readings: Theses of the International Conference, October 7–11, 2024*. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, p. 121.

Об авторах

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Лаборатория тектонофизики:

Борняков Сергей Александрович (<https://orcid.org/0000-0002-5119-1092>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, bornyak@crust.irk.ru

Каримова Анастасия Алексеевна (<https://orcid.org/0000-0003-3520-1913>), кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, tarasova@crust.irk.ru

Салко Денис Владимирович, ведущий инженер, denis@salko.net

Лаборатория инженерной сейсмологии и сейсмогеологии:

Добрынина Анна Александровна (<https://orcid.org/0000-0002-2087-4202>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, scisecretary@crust.irk.ru

Шагун Артем Николаевич (<https://orcid.org/0000-0002-3906-2650>), младший научный сотрудник, shagun@crust.irk.ru

Лаборатория современной геодинамики:

Саньков Владимир Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0002-1066-2601>), кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, sankov@crust.irk.ru

Мирошнichenko Андрей Иванович (<https://orcid.org/0000-0003-2749-8825>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, mai@crust.irk.ru

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия, лаборатория цифровизации горнотехнических процессов:

Пантелеев Иван Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, заместитель директора, pia@icmm.ru

АНО «Центр промышленной и экологической экспертизы», ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», г. Москва, Россия:

Встовский Григорий Валентинович, доктор физико-математических наук, ведущий эксперт, vstovsky@yandex.ru

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, «ВО «Безопасность», г. Москва, Россия:

Синцов Андрей Евгеньевич, советник, asintsov@mail.ru

About the Authors

Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch, RAS, Irkutsk, Russia

Laboratory of tectonophysics:

Bornyakov, Sergey A (<https://orcid.org/0000-0002-5119-1092>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, bornyak@crust.irk.ru

Karimova, Anastasia A. (<https://orcid.org/0000-0003-3520-1913>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Junior Researcher, tarasova@crust.irk.ru

Salko, Denis V., Leading Engineer, denis@salko.net

Laboratory of engineering seismology and seismogeology:

Dobrynina, Anna A. (<https://orcid.org/0000-0002-2087-4202>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, scisecretary@crust.irk.ru

Shagun, Artem N. (<https://orcid.org/0000-0002-3906-2650>), Junior Researcher, shagun@crust.irk.ru

Laboratory of modern geodynamics:

Sankov, Vladimir A. (<https://orcid.org/0000-0002-1066-2601>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Deputy Director, sankov@crust.irk.ru

Miroshnichenko, Andrey I. (<https://orcid.org/0000-0003-2749-8825>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, mai@crust.irk.ru

Institute of Continuum Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russia, Laboratory of digitalization of mining processes:

Pantelev, Ivan A. (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory, Deputy Director, pia@icmm.ru

Autonomous non-profit organization "Center for Industrial and Environmental Expertise", CJSC "TsNIIPSK im. Melnikov", Moscow, Russia:

Vstovsky, Grigory V., Doctor of Physics and Mathematics, Leading Expert, vstovsky@yandex.ru

Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, JSC VO "Safety", Moscow, Russia:

Sintsov, Andrey E., Advisor, asintsov@mail.ru

Поступила 12.11.2024

Принята к публикации 21.11.2024

Received 12 November 2024

Accepted 21 November 2024