


ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-53-4-142-167>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 534, 537.2, 537.86, 539.3, 550.34, 519.254, 519.651, 519.654



Предвестники землетрясений в теории критичности геодеформаций

*Б. М. Шевцов**, *О. В. Шереметьева*

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

Аннотация. Предвестники землетрясений рассматриваются как резонансные проявления критических геодеформаций, дислокационные изменения которых отвечают за аномальные свойства, как самих деформаций, так и порожденных ими физических процессов, играющих роль индикаторов подготовки землетрясений. С учетом вихревой природы сдвиговых дислокаций показано, что критические геодеформации – это переход в турбулентное состояние реологических течений в области формирования очага сейсмического события. Дана классификация предвестников землетрясений по их прямому или опосредованному отношению к дислокационным изменениям и показано, что от этого зависит вероятность прогноза землетрясений. В рамках теории критичности обсуждаются механизмы формирования предвестников землетрясений и то, чем обусловлены их аномальные свойства. В заключение рассмотрены результаты дробно-дифференциального моделирования различных фаз сейсмичности и проверки моделей с привлечением данных сейсмического каталога.

Ключевые слова: предвестники землетрясений, критические геодеформации, аномальные физические явления, скейлинг, дислокационные изменения, сейсмоакустические колебания, электризация горных пород, электромагнитная эмиссия, электродный эффект в атмосфере, токи смещения, ионосферные возмущения, дробный пуассоновский процесс, нестационарность, эрдитарность, сейсмический процесс, функция Миттаг-Леффлера, аппроксимация, статистическая модель, дробная модель.

Получение: 20.10.2025; Исправление: 12.11.2025; Принятие: 02.12.2025; Публикация онлайн: 03.12.2025

Для цитирования. Шевцов Б. М., Шереметьева О. В. Предвестники землетрясений в теории критичности геодеформаций // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2025. Т. 53. № 4. С. 142-167. EBN: WVPAWX. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-53-4-142-167>.

Финансирование. Работа выполнена за счёт Государственного задания ИКИР ДВО РАН (№ темы 124012300245-2)

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: bshev@ikir.ru


Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Шевцов Б. М., Шереметьева О. В., 2025

© ИКИР ДВО РАН, 2025 (оригинал-макет, дизайн, составление)



PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-53-4-142-167>

Research Article

Full text in Russian

PACS *43.40.Le, 41.20.-q, 41.20.Jb, 84.40.-x, 91.55.Mb, 91.30.Dk; MSC 60G22, 37M10, 33E12



Earthquake Precursors in the Theory of Criticality of Geodeformations

*B. M. Shevtsov**, *O. V. Sheremetyeva*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034,
Kamchatka Krai, Paratunka village, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. Earthquake precursors are considered as resonant manifestations of critical geodeformations, dislocation changes of which are responsible for the anomalous properties of both the deformations themselves and the physical processes generated by them, which play the role of indicators of earthquake preparation. Taking into account the vortex nature of shear dislocations, it is shown that critical geodeformations are a transition to a turbulent state of rheological flows in the area of the formation of a seismic event focus. Earthquake precursors are classified according to their direct or indirect relation to dislocation changes and it is shown that the probability of earthquake prediction depends on this. Within the framework of the criticality theory, the mechanisms of formation of earthquake precursors and the causes of their anomalous properties are discussed. In conclusion, the results of fractional differential modeling of various phases of seismicity and model verification using data from the seismic catalog are considered.

Key words: earthquake precursors, critical geodeformations, anomalous physical phenomena, scaling, dislocation changes, seismoacoustic vibrations, electrification of rocks, electromagnetic emission, electrode effect in the atmosphere, displacement currents, ionospheric disturbances, fractional Poisson process, seismic process, Mittag-Leffler's function, approximation, statistical model, fractional model.

Received: 20.10.2025; Revised: 12.11.2025; Accepted: 02.12.2025; First online: 03.12.2025

For citation. Shevtsov B. M., Sheremetyeva O. V. Earthquake precursors in the theory of criticality of geodeformations. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2025, 53: 4, 142-167. EDN: WVPAWX. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-53-4-142-167>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (subject registration No. 124012300245-2)

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: bshev@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Shevtsov B. M., Sheremetyeva O. V., 2025

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2025 (original layout, design, compilation)



Введение

В основе аномальных явлений лежит скейлинг (степенное распределение по масштабам) сдвиговых дислокационных изменений [1–4], сопровождающих критические геодеформации и представляющих собой вихревые образования в диапазоне масштабов от миллиметров до сотен километров, что соответствует размерам кристаллитов и тектонических плит. Предвестники землетрясений – это обширный комплекс аномальных физических явлений, обусловленных критическими геодеформациями, возникающими по мере приближения напряжений в горных породах к критическим значениям. Такая аналогия позволяет рассматривать критические геодеформации как переход в турбулентное состояние косейсмических реологических течений, обеспечивающий высокую энергетику резонанса аномальным физическим явлениям, используемым в качестве предвестников землетрясений. Скейлинг, нелинейность турбулентного состояния и резонанс – это три характерных признака критичности геодеформаций.

Основы теории критичности геодеформаций и сейсмичности рассмотрены в [5, 6], а ее обоснование с помощью сейсмоданных в [7, 8]. В [9] дислокационные изменения представлены как аномальный диффузионный процесс с памятью и с учетом его неоднородности и нестационарности. Такой процесс характеризуется четырьмя дробными параметрами, которые определяют его критичность. Обратный диффузионный процесс, представляющий консолидацию дислокационных изменений, рассмотрен на примере форшоков в [10]. Консолидация дислокационных изменений – это модель генерации главного удара. Здесь можно привести аналогию с генерацией гигантского импульса в лазерной физике и нелинейными колебаниями в различных областях науки [11, 12].

Предвестник землетрясения, непосредственно связанный с дислокационными изменениями в горных породах – это сейсмоакустическая эмиссия, низкочастотный диапазон которой включает сейсмические колебания, а высокочастотный – акустические. За генерацию сейсмоакустических колебаний отвечает разнонаправленное движение бортов дислокаций, вследствие электризации которых создается электрический ток, ответственный за возникновение электромагнитной эмиссии. Суммарный электрический ток дислокаций порождает обширную электризацию горных пород, проникающую токами смещения и проводимости в ионосферу.

С учетом ответной реакции на это электростатическое проникновение в ионосферу, электризация рассматривается как литосферно-ионосферное взаимодействие или объединение, формирующее ионосферное возмущение над областью критических геодеформаций. Это возмущение можно рассматривать как электростатическое отражение в ионосфере литосферной области подготовки землетрясения, которое представляет интерес для решения обратной задачи в целях наблюдений развития критических геодеформаций и формирования очага сейсмического события.

Аномальное ионосферное возмущение известно как один из предвестников землетрясений, опосредованно (через электризацию) связанный с критическими геодеформациями. Однако сложный характер распространения электризации через различные среды и проникновения ее в ионосферу понижает надежность этого предвестника в сравнении с сейсмоакустической и электромагнитной эмиссией. О корреляции сейсмических событий и их предвестников см. разделы ниже.

В этой статье будет рассмотрен комплекс аномальных физических явлений, обусловленных критическими геодеформациями и используемых в качестве предвестников землетрясений.

Цикличность сейсмического процесса

В развитии сейсмического процесса можно выделить четыре стадии [1–4]: 1) фоновой сейсмичности и внезапного упрочнения горных пород, 2) сейсмического затишья и накопления упругих напряжений, 3) форшоковой последовательности с главным ударом и 4) афтершоковой последовательности как окончательной разрядки накопленных упругих напряжений (рис. 1). Затем этот цикл нелинейных колебаний повторяется. С учетом цикличности прогнозируется развитие сейсмического процесса на различных временных интервалах. Модели нелинейных релаксационных колебаний различного уровня сложности представлены в работах [11, 12].

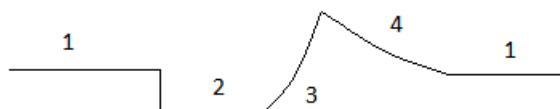


Рис. 1. Стадии релаксационных нелинейных колебаний сейсмичности
Figure 1. Stages of relaxation nonlinear oscillations of seismicity

В плане краткосрочного прогноза землетрясений наибольший интерес представляют вторая и третья фазы цикличности сейсмического процесса. Вторая фаза в связи с тем, что она определяет энергию накопленных упругих напряжений и является фазой подготовки землетрясения, а в течение третьей фазы происходит активизация сейсмического процесса, развитие критических геодеформаций и формирование краткосрочных предвестников землетрясения, предваряющих главный удар. Его основной предвестник – это форшоковая последовательность, которая начинается с малых масштабов и развивается до масштаба главного удара, определяемого второй фазой цикличности сейсмического процесса, накопления энергии упругих напряжений.

Критические геодеформации в течение третьей фазы цикличности сейсмического процесса соответствуют переходу реологических течений в

турбулентное состояние. Вихревые возмущения развиваются от малых масштабов к большим, что соответствует консолидации дислокационных изменений по законам обратной диффузии, аномальной (замедленной), неоднородной, эредитарной (с «памятью») и нестационарной [9]. Обратный диффузионный процесс турбулентных возмущений стягивается в точку главного удара. После главного удара, на четвертой фазе цикличности сейсмического процесса, обратная диффузия переходит в прямую [9], и турбулентные возмущения распространяются от точки главного удара к периферии в виде последовательности афтершоков. Представление сейсмического процесса на третьей фазе его развития в виде обратной диффузии позволяет прогнозировать время и место главного удара [10].

Роль дислокаций

Критические геодеформации, возникающие по мере приближения напряжений в горных породах к критическим значениям, сопровождаются дислокационными изменениями. Благодаря степенному распределению дислокаций по размерам сами критические геодеформации и все связанные с ними физические процессы, которые рассматриваются в качестве предвестников землетрясений, приобретают аномальные свойства.

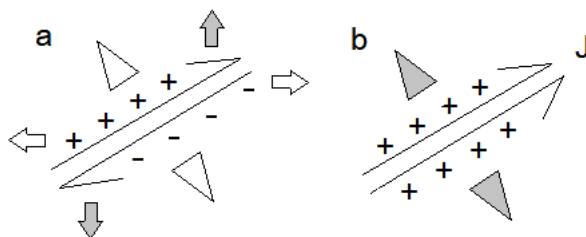


Рис. 2. а – Генерация дислокациями сейсмоакустических колебаний, стрелками показаны направления распространения продольных волн, а треугольниками – поперечных колебаний, стрелки с заполнением – волны сжатия, а без заполнения – волны растяжения, на бортах дислокации знаки электрического заряда. б – Эквивалентная электрическая схема генерации дислокациями электрического тока J и электромагнитной эмиссии, направления которой показаны треугольниками с заполнением

Figure 2. a – Generation of acoustic vibrations by dislocations, arrows show the directions of longitudinal waves and triangles show transverse vibrations, arrows with filling are compression waves, and without filling are stretching waves. b – An equivalent electrical circuit for generating electric current J and electromagnetic emission by dislocations, the directions of which are shown by triangles with filling

Дробные параметры и критические индексы аномальной (замедленной), неоднородной, эредитарной (с «памятью») и нестационарной диффузии, по

законам которой развиваются дислокационные возмущения, можно определить по данным сейсмического каталога для форшоков и афтершоков [2–4, 7, 8, 10], что позволяет прогнозировать развитие сейсмического процесса на его третьей и четвертой стадиях цикличности, т. е. на стадиях подготовки главного удара и окончательной разрядки напряжений [2–4, 7, 8, 10].

Сдвиговые дислокации являются источниками продольных и поперечных акустических колебаний [13, 14], за генерацию которых отвечает разнонаправленное движение бортов дислокаций (рис. 2а). При электризации бортов дислокации трением они становятся еще и генератором электрического тока (рис. 2b), ответственного за электромагнитную эмиссию [13, 14] и электризацию горных пород [15].

Эффективность разделения зарядов на бортах дислокаций определяется свойствами и состоянием горных пород. В результате противоположного движения разнозаряженных бортов дислокаций создается импульс электрического тока J , который становится источником электромагнитной эмиссии. Поток электрических импульсов дислокационных изменений формирует суммарный электрический ток критических геодеформаций ΣJ , определяющий электризацию горных пород и атмосферы (рис. 3).

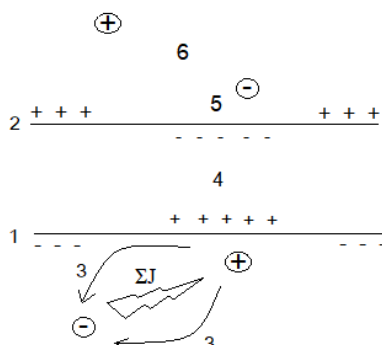


Рис. 3. Электризация горных пород и атмосферы критическими геодеформациями в области подготовки землетрясения: ΣJ – суммарный электрический ток дислокаций, 1 – земная поверхность, 2 – нижняя граница ионосферы, 3 – токи замыкания, 4 – область токов смещения и проводимости, 5 – возмущения в ионосфере, 6 – виртуальное электростатическое отражение в ионосфере области генерации электрического тока критическими геодеформациями

Figure 3. Electrification of rocks and atmosphere by critical geodeformations in the area of earthquake preparation: ΣJ – total electric current of dislocations, 1 – the Earth's surface, 2 – the lower boundary of the ionosphere, 3 – short-circuit currents, 4 – the area of displacement and conduction currents, 5 – disturbances in the ionosphere, 6 – virtual electrostatic reflection in the ionosphere of the area of electric current generation by critical geodeformations

Разделение электрических зарядов суммарным током дислокаций ΣJ в области подготовки землетрясения производится и поддерживается дислокационными изменениями деформационного процесса в режиме динамического равновесия между токами электризации ΣJ и токами замыкания 3 (рис. 3).

Процесс электризации горных пород распространяется на нижние слои атмосферы и проникает в ионосферу за счет токов смещения 4 (рис. 3), и создает там аномальные возмущения 5 (рис. 3), которые используются в качестве предвестников землетрясений [16–21]. Вследствие низкой электропроводности нижних слоев атмосферы возмущение в ионосфере создается атмосферными электрическими токами смещения. Вклад атмосферных токов проводимости в ионосферные возмущения мал [22, 23], но они дают поправки к электростатическому отражению в ионосфере 6 (рис. 3), области разделения зарядов в литосфере ΣJ (рис. 3). Ионосферное возмущение представляет интерес для решения обратных задач электростатики в целях локации области критических геодеформаций.

Электрическая атмосферная неоднородность

Атмосферные токи проводимости создают распределение по высоте плотности электрических зарядов на градиентах электропроводности атмосферы. Это следует из соотношений: $dE(z)/dz = \rho(z)$ и $j_z(z) = \sigma(z)E(z) = \text{const}$, где $E(z)$ – вертикальная компонента атмосферного электрического поля, $\rho(z)$ – вертикальное распределение плотности электрического заряда, $\sigma(z)$ – вертикальная зависимость электропроводности атмосферы, $j_z(z) = j_z$ – вертикальная компонента электрического тока. Подставляя второе соотношение в первое, получим: $\rho(z) = -j_z \sigma'(z)/\sigma^2(z)$.

Это распределение плотности электрического заряда определяет атмосферную электрическую неоднородность над областью критических геодеформаций, влияющую на распространение ОНЧ радиоволн.

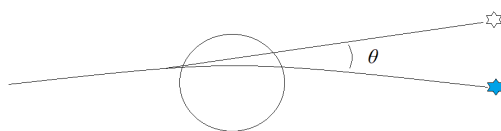


Рис. 4. Смещение пеленга источника радиосигнала вследствие рефракции радиоволн на атмосферной неоднородности над областью подготовки землетрясения, где θ – угол рефракции

Figure 4. The offset of the bearing of the radio signal source due to the refraction of radio waves on atmospheric inhomogeneity over the earthquake preparation area, where θ is the angle of refraction

Наблюдаемые аномалии в вариациях амплитуды, фазы и пеленга радиосигналов используются в качестве предвестников землетрясений [24–26]. Схему радионаблюдений изменения пеленга сигнала см. на рис. 4.

Угол рефракции можно оценить как $\theta \approx \lambda/D$, где λ – длина волны, D – диаметр неоднородности. При длине волны 30 км и диаметре неоднородности 300 км получаем 0.1 радиан или 5 градусов. Такой угол рефракции радиоволн при их распространении над областью подготовки землетрясения наблюдался в работах [25, 26].

Наблюдения рефракции радиоволн позволяют методами радиотомографии локализовать атмосферную неоднородность над областью критических геодеформаций и получить данные о формировании очага землетрясения.

А методом решения обратной задачи электростатики по ионосферным данными, полученным с помощью ионозонда, ракурсного рассеяния радиоволн и спутниковой GPS радиотомографии, можно определить распределение электрического заряда в литосфере (рис. 3). Это будет использованием ионосферного предвестника в целях дистанционного зондирования горных пород.

Надо отметить, что значительные изменения $\sigma(z)$ имеют место на верхней и нижней границах атмосферного радиоволнового слоя, в результате чего там формируются слои электрических зарядов повышенной плотности (рис. 3), что является следствием так называемого электродного эффекта, благодаря которому возникает отрицательная бухта в изменениях напряженности электрического поля атмосферы во время критических геодеформаций. Аномальное поведение атмосферного электрического поля используется в качестве предвестника землетрясений [27].

У земной поверхности электрические заряды могут стать центрами конденсации водяных паров, а выделяемая при этом теплота испарения может регистрироваться в инфракрасном излучении атмосферы. Это аномальное явление также используется в качестве предвестника землетрясения [28].

Основные предвестники землетрясений

Особый интерес в качестве предвестников землетрясений представляют корреляции сейсмоакустической и электромагнитной эмиссий между собой и с геодеформациями [13, 14].

Комплексные наблюдения проводятся одновременно в трех средах: сейсмоакустической эмиссии в водоемах, электромагнитной эмиссии в атмосфере и геодеформаций в приповерхностных породах. Сейсмоакустическую эмиссию можно наблюдать и в водонаполненных скважинах [29, 30], а их обсадные металлические трубы можно использовать как подземные радиоантенны для наблюдений электромагнитной эмиссии [30].

Поскольку сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии непосредственно связаны с дислокационными изменениями критических геодеформаций, то по эффективности они превосходят все другие виды наблюдений. Однако и у них

есть ограничения, например, по дальности распространения сигналов. Схема сейсмоакустических и электромагнитных наблюдений представлена на рис. 5.

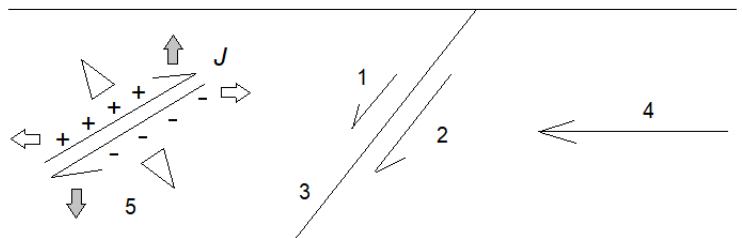


Рис. 5. Зона субдукции: 1 и 2 – направления косейсмических течений горных пород, 3 – плоскость раздела тектонических плит, 4 – ось сжатия, 5 – дислокация, представленная в увеличенном виде, на ее бортах знаки электрического заряда, J – ток дислокации, стрелки с заполнением – направления продольных сейсмоакустических колебаний сжатия, стрелки без заполнения – направления продольных сейсмоакустических колебаний растяжения, треугольники – направления поперечных сейсмоакустических колебаний и электромагнитного излучения

Figure 5. Subduction zone: 1 and 2 – directions of coseismic rock flows, 3 – plane of separation of tectonic plates, 4 – axis of compression, 5 – dislocation, represented in enlarged form, on its sides signs of electric charge, J – dislocation current, filled arrows – directions of longitudinal seismoacoustic vibrations of compression, arrows without filling – directions of longitudinal seismoacoustic vibrations of stretching, triangles – directions of transverse seismoacoustic vibrations and electromagnetic radiation

Область сдвиговых геодеформаций, представленная на рисунке увеличенной дислокацией 5, находится на значительном удалении от зоны субдукции, в пределах действия сил сжатия. Стрелки направлений распространения излучений на рис. 5 указывают на возможные места выхода излучений на дневную поверхность.

Сейсмоакустические колебания рассеиваются на неоднородностях среды, а электромагнитные волны поглощаются вследствие электропроводности горных пород, поэтому прямые излучения, созданные дислокациями в зоне субдукции, не выходят на дневную поверхность. На больших расстояниях от зоны субдукции в приповерхностных породах наблюдается эмиссия, созданная пластическими геодеформациями, возникшими в обширной области сжатия горных пород.

Моделирование области сжатия [31–34] позволяет прогнозировать места выхода акустических и электромагнитных излучений на дневную поверхность. А по пеленгу и интенсивности геоакустических и электромагнитных сигналов

определяется направление главной оси сжатия, что позволяет оценить местоположение области подготовки землетрясений в зоне субдукции. Исследования на предмет соответствия пеленга сигналов направлению оси сжатия проводились с помощью акустических векторно-фазовых приемников [31, 34]. А связь акустических и электромагнитных эмиссий рассматривалась в работах [13, 14].

Комплексные сейсмоакустические и электромагнитные наблюдения с последующим решением обратной задачи теории упругости и нахождением направления оси сжатия позволяют осуществлять локацию области подготовки землетрясений. Это оптимальный подход к решению задачи краткосрочного прогноза землетрясений, который позволяет оценить и область, и время, и вероятность события. Конечно, это не исключает всех других подходов, которые могут подтверждать или уточнять результаты прогноза по основным предвестникам землетрясений, сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии.

Облачные структуры

Известен еще один предвестник, наблюдаемый в атмосфере над областью подготовки землетрясения в виде периодических структур облачности, возникающих вследствие выхода в атмосферу инфразвуковых колебаний, генерируемых критическими геодеформациями. Дело в том, что амплитуда этих колебаний возрастает с высотой в связи с падением акустического импеданса атмосферы, в результате чего создаются условия для конденсации водяных паров. Однако причинами подобных явлений могут быть циклоны и топографические эффекты, поэтому в наблюдениях этого предвестника возникает проблема исключения помех. Кроме этого, необходимы благоприятные погодные условия, в связи с этим мало сообщений о наблюдениях этого предвестника.

Образование облачных структур над областью подготовки землетрясения связывают еще и с эманацией в атмосферу радона, распад которого сопровождается ионизацией воздуха, а ионы становятся центрами конденсации водяных паров. Но это очень опосредованный предвестник землетрясений, поскольку эманация радона в атмосферу зависит не только от деформационной активности, но и от концентрации радона в земле. Такой предвестник трудно обнаружить при неблагоприятных погодных условиях.

Геофизические процессы

Критические геодеформации понижают целостность горных пород и переводят в турбулентное состояние реологические течения, что способствует росту диффузии геохимических элементов и выходу их в атмосферу. Наблюдения этих аномальных процессов проводятся в скважинах и в приповерхностном слое атмосферы. Результаты используются в целях прогноза землетрясений [35–37].

По эффективности геофизические предвестники сравнимы с атмосферными, поскольку они зависят от дислокационных изменений не напрямую, как сейсмоакустическая эмиссия, а опосредованно, через изменения свойств и состояния горных пород, а также через агрегатные состояния и концентрации химических элементов.

Высыпания заряженных частиц из радиационных поясов

Есть и совсем экзотические предвестники землетрясений, например, высыпания заряженных частиц из радиационных поясов, на характеристики которых могут воздействовать сейсмоакустические колебания, индуцирующие в проводящей среде вариации магнитного поля. Очевидно, что из-за внушительных расстояний до магнитосферы связь ее с критическими геодеформациями очень слабая, а значит, и вероятность возникновения этого предвестника мала.

Известно, что геомагнитные пульсации приводят к высыпаниям заряженных частиц из радиационных поясов. А пульсации эти могут возникать как в результате магнитных бурь, так и при активизации сейсмичности. Второе обсуждается только на уровне предположений.

Вероятности прогноза землетрясений

Рассмотрим в заданном временном интервале и выделенном объеме вероятности сейсмических событий и их предвестников, а также корреляции между ними. В силу того, что все предвестники землетрясений так или иначе связаны с критическими геодеформациями, которые представлены сейсмоакустической эмиссией, то прогноз землетрясений по существу сводится к определению автокорреляционной функции сейсмоакустической эмиссии (автокорреляций случайного процесса). А поскольку на третьей фазе цикличности сейсмического процесса он развивается от малых масштабов к большим, то возникают корреляции сигналов поочередно в соседних частотных диапазонах: акустической эмиссии, высокочастотного сейсмического шума, форшоков и главного удара, причем масштаб последнего определяется второй фазой цикличности сейсмического процесса. В частотных диапазонах сейсмоакустического процесса возникает цепочка автокорреляций от высоких частот к малым (от малых пространственных масштабов к большим). Остановка происходит на масштабе главного удара.

Последовательность автокорреляций в частотных диапазонах – это проявления процесса обратной диффузии, консолидации (самоорганизации) дислокационных изменений критических геодеформаций и рост радиуса корреляции сейсмоакустического процесса до масштаба главного удара, который определяется накопленными упругими напряжениями на второй фазе цикличности сейсмического процесса.

В связи с особым положением сейсмоакустической эмиссии возникает вопрос, а зачем вообще нужны все остальные предвестники землетрясений, если достаточно использовать для прогноза землетрясений только сейсмоакустическую эмиссию? Комплекс остальных аномальных физических явлений представляет интерес для прогноза землетрясений как дополнительная информация, особенно в тех случаях, когда акустические колебания не могут распространяться из области критических геодформаций, а вместо них наблюдаются, например, процессы электризации, электромагнитная эмиссия, диффузия и эманация геохимических элементов. Эти предвестники не напрямую, а косвенно связаны с дислокационными изменениями, поэтому они имеют меньшую вероятность возникновения по сравнению с сейсмоакустической эмиссией.

Вероятности землетрясений и их предвестников определяются числами предвестников с событием – Π_1 , событий с предвестником – C_1 ($\Pi_1 = C_1$), событий без предвестника – C_2 и предвестников без события – Π_2 . Все это рассматривается на заданном временном интервале и в выделенном объеме. Имеем три независимых числа, поскольку $\Pi_1 = C_1$ – это число корреляций предвестников и событий, число корреляций двух случайных процессов или число автокорреляций одного случайного процесса, если в качестве предвестников и событий рассматривается сейсмоакустическая эмиссия.

События без предвестника – внезапные землетрясения, а предвестники без события – ложные тревоги.

Вероятность события при условии того, что был предвестник, (условная вероятность события) равна $C_1/(C_1 + C_2)$, а безусловная – $C_2/(C_1 + C_2)$. В сумме они, разумеется, равны единице. Внезапные землетрясения непрогнозируемые по предвестнику, но прогнозируемые по безусловной вероятности.

При наблюдении предвестника, вероятность того, что произойдет землетрясение, выражается как $\Pi_1/(\Pi_1 + \Pi_2)$, а вероятность того, что имеет место ложная тревога, – $\Pi_2/(\Pi_1 + \Pi_2)$. В сумме они равны единице.

Вероятность прогноза землетрясения по наблюдениям их предвестников $\Pi_1/(\Pi_1 + \Pi_2)$ понижается при увеличении чисел внезапных землетрясений и ложных тревог C_2 и Π_2 . Это следует из $\Pi_1 = C_1$ и неизменности сумм $C_1 + C_2$ и $\Pi_1 + \Pi_2$. Числа C_2 и Π_2 , влияющие на эффективность прогноза землетрясений, определяются сейсмическим процессом и особенностями конкретного предвестника землетрясений. Если предвестник опосредованный, то эффективность прогноза землетрясений падает тем сильнее, чем длиннее опосредованная связь. Поневоле выбор падает на сейсмоакустическую эмиссию, с ней по эффективности сравнима лишь электромагнитная эмиссия. Затем идет целый комплекс предвестников литосферно-ионосферного взаимодействия и геофизических процессов.

Три независимых числа $\Pi_1 = C_1$, C_2 и Π_2 , определяющих вероятности прогноза землетрясений, находятся по данным многолетних наблюдений в заданном временном интервале и выделенном объеме с помощью метода наложения эпох. Определенные по этим числам вероятности прогноза землетрясений являются характеристиками сейсмического полигона, позволяющими оценить уровень

сейсмической опасности по условной вероятности при обнаружении предвестника землетрясений и по безусловной в его отсутствие.

Условные вероятности прогноза землетрясений, полученные с помощью анализа данных многолетних наблюдений методом наложения эпох, составляют 0.75 – 0.8 по основным предвестникам и около 0.6 по опосредованным.

Теория критичности

Основными признаками критичности являются скейлинг, нелинейность и резонанс. Скейлинг – это особый тип степенной нелокальности, а под резонансом часто понимают взрывной или аномальный характер процесса.

Предвестники землетрясений как физические процессы, порожденные критическими геодеформациями, имеют все признаки критичности, как и сами геодеформации.

Идея критичности предвестников землетрясений возникла из описания сейсмического процесса обычным составным процессом Пуассона [5, 6], интенсивностью которого является гармонический ряд частот повторяемости процесса на различных энергетических уровнях. Если расширить этот ряд от сейсмического до сейсмоакустического, т.е. учесть высокие частоты, то получается процесс взрывного типа, что и происходит на стадии активизации сейсмического процесса, на стадии форшоков, которая завершается главным ударом.

Обобщить обычный составной процесс Пуассона до нестационарного не представляет особого труда, а если придать ему еще свойство памяти, то это только усиливает его нестационарность, что и требуется для описания взрывных процессов. А что касается предвестников землетрясений, то они наследуют свои аномальные свойства от критических геодеформаций, дислокационные изменения которых обладают скейлингом, основным признаком критичности.

В заключение этого раздела сравним теорию критичности с моделью ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence). Модель ETAS, в отличие от теории критичности геодеформаций, не дает объяснения, чем определяется коэффициент размножения афтершоков, который в теории критичности называется коэффициентом нестационарности процесса. Эта заимствованная модель не раскрывает физику сейсмического процесса и предвестников землетрясений. Более того, невозможно развернуть развитие эпидемии в обратном направлении для получения описания последовательности форшоков, но это можно сделать с процессом диффузии, который используется в теории критичности.

В этой статье впервые предвестники землетрясений рассмотрены с позиций теории критичности и показано, что аномальные свойства физических процессов в области подготовки землетрясений возникают благодаря скейлингу, нелинейности и резонансному поведению дислокационных изменений критических геодеформаций.

Статья посвящена критичности геодеформаций и аномальным ее проявлениям в предвестниках землетрясений. Идея критичности в расходимости гармонических рядов [5, 6], а ее проявление можно наблюдать в смене состояний воды при ее нагреве: потрескивание, широкополосный шум и кипение. Первые два состояния можно рассматривать в качестве предвестников третьего, используя это в качестве аналогии сейсмоакустическому процессу.

В следующем разделе мы перейдем к обсуждению результатов моделирования форшоков и афтершоков на основе нестационарного эредитарного (обладающего «памятью») составного процесса Пуассона с использованием данных сейсмического каталога для определения параметров модели.

Моделирование

Исследование проводится в рамках дробной модели деформационного процесса [1, 3, 12], где в качестве модели используется составной пуассоновский процесс [38, 39] в дробном обобщении [40–42] с учетом степенного распределения частот возникновения событий (форшоков или афтершоков) [43, 44]. В контексте дробной модели деформационного процесса на всех масштабных уровнях процесс деформации протекает одинаково.

Верификация модели в фазе активации (фаза форшоков) была представлена в работах [3, 10] на основании данных каталога землетрясений Камчатского филиала ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) (01.01.1962 – 31.12.2002, зона субдукции Курило-Камчатской островной дуги) [45]. Эмпирические закономерности, полученные авторами исследований [8, 46, 47], были использованы для тестирования модели в фазе релаксации (фаза афтершоков). Аппроксимация трёхпараметрической функцией Миттаг-Леффлёра показала хорошее приближение экспериментальных закономерностей [2], полученных в результате обработки данных сейсмических каталогов США (Калифорния) [46] и Италии [47]. Отметим, что при аппроксимации зависимостей, полученных авторами работы [47] на основе итальянских каталогов афтершоков параметры ν и $\tilde{\nu}$ функции Миттаг-Леффлёра характеризуются близкими значениями [2].

В соответствии с принятой моделью трёхпараметрического дробного пуассоновского процесса, которая позволяет нам представлять как нормальные, так и аномальные процессы активации и релаксации [3, 8, 10], законы распределения времени ожидания форшоков (фаза активации) аппроксимируются возрастающей дробной функцией Миттаг-Леффлёра с параметрами $\tilde{\mu}$, ν и $\tilde{\nu}$:

$$E_{\nu}(-[\tilde{\mu}(t^* - t_f)]^{\tilde{\nu}}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-[\tilde{\mu}(t^* - t_f)]^{\tilde{\nu}})^k}{\Gamma(\nu k + 1)}, \quad t_f < t^*, \quad (1)$$

и законы распределения афтершоков (фаза релаксации) аппроксимируются убывающей функцией Миттаг-Леффлёра:

$$E_{\nu}(-[\tilde{\mu}(t_{af} - t^*)]^{\tilde{\nu}}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-[\tilde{\mu}(t_{af} - t^*)]^{\tilde{\nu}})^k}{\Gamma(\nu k + 1)}, \quad t_{af} > t^*, \quad (2)$$

где $\tilde{\mu}$ – средняя интенсивность (плотность) потока событий при деформационном возмущении в данной области, ν – параметр эрeditarности дробного пуассоновского процесса ($0 < \nu \leq 1$), $\tilde{\nu}$ – параметр нестационарности ($0 < \tilde{\nu} \leq 1$), t^* – момент времени главного удара.

Обработка данных

Исследование проводилось на основании данных каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги за период с 1 января 1962 г. по 31 декабря 2002 г. Рассматривали область, ограниченную широтами 46° с.ш. и 62° с.ш. и долготами 158° в.д. и 174° в.д. [45].

Построение распределений проводили следующим образом: в каталоге выделяли все главные удары заданного класса К. На промежутке времени между ближайшими главными ударами класса К события классифицировали как форшоки и афтершоки с помощью алгоритма, представленного в статье [48]. Используя статистическую модель пластических деформаций [49], для каждого главного удара заданного класса К находили связанные с ним события более низких энергетических классов в соответствии с пространственно-временным критерием, сформулированным на основании закона Гутенберга-Рихтера [44] и закона Добровольского [50]. Для поиска связанных событий использовали два алгоритма [10]: первый алгоритм помечает событие как связанное с главным ударом, если оно включено в пространственно-временную область влияния главного удара, а второй – если оно включено в пространственно-временную область влияния как главного удара, так и уже идентифицированных связанных с главным ударом событий.

В работах [3, 8, 10] указывалось на то, что статистика сейсмических событий в каталоге КФ ФИЦ ЕГС РАН мала для построения распределений событий (форшоков или афтершоков) заданной энергии в зависимости от времени до главного удара фиксированного энергетического класса К. А именно, суммарное количество форшоков или афтершоков заданной энергии для всех главных ударов энергетического класса К в используемом каталоге [45] в самом лучшем случае не превышает 330 событий. Если учесть, что объём выборок главных ударов варьируется в пределах от 60 до 120 событий, то в среднем получается 3 – 5 связанных событий фиксированной энергии для отдельного главного удара. Следовательно, в таком случае уверенно построить эмпирические распределения для одного главного удара невозможно. Поэтому в исследовании был использован метод наложения эпох, т. е. мы объединили выборки форшоков или афтершоков для всех главных ударов класса К. Такой подход позволяет найти распределения

времени ожидания форшоков или афтершоков и на основании их аппроксимации функцией Миттаг-Леффлёра сделать вывод о характере деформационного процесса в регионе в фазах активации и релаксации, исходя из полученных значений параметров μ , ν и $\tilde{\nu}$ дробного пуассоновского процесса [3].

Как указывалось в статье [3], события энергетических классов от 8.5 до 12.9 имеют достаточные размеры выборок для статистического анализа данных. В рассматриваемом интервале энергетических классов в качестве главных ударов выбраны события со значениями класса 12.0 – 12.9, что также определялось репрезентативностью соответствующих выборок. В исследовании использовались выборки форшоков или афтершоков фиксированного энергетического класса, размеры которых превышают значение 75. На основе каждой выборки форшоков или афтершоков составляли распределение относительной частоты возникновения этих событий за сутки в зависимости от времени до главного удара. Если количество событий в день не превышало значения 5, то этот временной интервал объединялся с предыдущим соседним интервалом, пока количество событий не достигало пяти или более. Полученные распределения были использованы для построения функций распределения относительной частоты возникновения форшоков или афтершоков в зависимости от времени до главного удара, т.е. экспериментального закона распределения времени ожидания форшоков или афтершоков.

Аппроксимация функцией Миттаг-Леффлёра экспериментального закона распределения времени ожидания форшоков или афтершоков

В статьях [3, 10] было показано, что использование функции Миттаг-Леффлёра в качестве аппроксимирующей даёт более высокую точность приближения, чем использование экспоненты. Поэтому в данном исследовании использовалась трёхпараметрическая аппроксимирующая функция Миттаг-Леффлёра в записи (1) и (2), а экспонента является частным случаем, когда параметр эредитарности ν равен единице. Ограничения на параметры ν , $\tilde{\nu}$, μ аппроксимирующей функции Миттаг-Леффлёра были определены на основе положений используемой дробной модели деформационного процесса, рассчитанных на основе каталога [45] средних значений плотности потока сейсмических событий в рассматриваемом регионе, а также результатов численного эксперимента. При проведении численного эксперимента значения параметров ν и $\tilde{\nu}$ изменяются с шагом 0.01 в пределах интервала (0; 1], а значение параметра μ изменяется с шагом 0.001 в интервале, включающем значение, равное среднему числу событий заданной энергии в единицу времени в рассматриваемом регионе. Для аппроксимации использовалось точечное представление ступенчатой функции распределения времени ожидания форшоков или афтершоков. А именно, каждой ступени сопоставлялась её середина. Расчет наилучшей аппроксимации экспериментального закона

распределения времени ожидания форшоков и афтершоков осуществлялся методом наименьших квадратов с минимизацией средней ошибки аппроксимации ε .

Результаты и обсуждение

В исследовании используются два алгоритма обработки данных каталога [45]. Выбор алгоритма влияет как на размеры выборок форшоков и афтершоков, так и на величину самого длинного временного интервала T_{\max} между главным ударом и его форшоком или афтершоком, который является областью определения экспериментального закона распределения времени ожидания форшоков или афтершоков. А именно, выборки форшоков и афтершоков, полученные с помощью второго алгоритма, имеют бóльший объём, поскольку они включают события, связанные не только с главным ударом, но и с его ранее идентифицированными форшоками или афтершоками. Кроме того, увеличивается длина временного интервала T_{\max} , т.е. эмпирические законы распределения времени ожидания форшоков или афтершоков имеют бóльшую область определения. Следует отметить, что для главных ударов малых энергий, т.е. до энергетического класса 12.3, значения наибольших временных интервалов T_{\max} между главным ударом и его форшоком или афтершоком (область определения эмпирической функции) либо одинаковы, либо отличаются незначительно в соответствии с результатами обоих алгоритмов.

Использование функции Миттаг-Леффлёра в виде (1) и (2) в качестве аппроксимирующей функции для эмпирических законов распределения времени ожидания форшоков или афтершоков даёт погрешность ε , не превышающую трех процентов, что свидетельствует о высокой точности приближения.

Основываясь на полученной аппроксимации экспериментального закона распределения времени ожидания как форшоков, так и афтершоков функцией Миттаг-Леффлёра (1), (2), значения плотности потока событий $\dot{\mu}$ во время деформационного возмущения имеют порядок 10^{-2} , а в отдельных случаях они имеют порядок 10^{-1} , что не противоречит средним оценкам, основанным на данных каталога [45]. Отметим, что значения параметра $\dot{\mu}$, полученные по результатам аппроксимации, варьируются в пределах значений [0.015, 0.2].

Значения дробного параметра ν , который отвечает за эредитарные свойства процесса, т.е. «память», как для форшоков, так и для афтершоков, обычно варьируются в диапазоне [0.95, 0.99]. Это указывает на то, что память процесса слаба или отсутствует, и процесс в данном случае ближе к стандартному пуассоновскому процессу. Значение параметра ν зависит от количества событий, попадающих в хвост распределения. Если при использовании второго алгоритма объём выборки увеличивается за счет включения событий, удаленных по времени от главного удара, и при незначительном изменении области определения эмпирической функции распределения времени ожидания форшоков или афтершоков по сравнению с результатами первого алгоритма, то значения параметра эредитарности ν уменьшаются. Тогда это позволяет нам говорить о

наличии эредитарного свойства у данного процесса. Для форшоков главных ударов классов 12.2 – 12.4 параметр ν в отдельных случаях принимает значение в диапазоне от 0.7 до 0.8. Причем для афтершоков был получен более широкий диапазон значений параметра $\nu \in (0.5, 0.9)$ и для более широкого диапазона классов главных ударов 12.4 – 12.9. Таким образом, эредитарные свойства больше проявляются при афтершоках.

Нестационарность процесса деформации характеризует параметр $\tilde{\nu}$. Вычисленные значения параметра $\tilde{\nu}$ меньше единицы и находятся в диапазоне значений $[0.4, 0.9]$. Значения параметра нестационарности $\tilde{\nu}$ для функции распределения времени ожидания форшоков классов K_f менее 9.0 близки к единице (больше значения 0.8) для главных ударов всех рассматриваемых энергетических классов, за исключением 12.0. Иная картина наблюдается для афтершоков. Значения параметра $\tilde{\nu}$ превышают 0.9 только для афтершоков классов $K_{af} = 8.6, 8.7, 8.9, 9.3, 9.4$ главного удара класса 12.9. Только в этих случаях процесс близок к стационарному, когда $\tilde{\nu} = 1$.

Значения соответствующих управляющих параметров, рассчитанных для эмпирических функций распределения времени ожидания форшоков или афтершоков, построенных с использованием двух алгоритмов, отличаются друг от друга. Однако диапазон изменения значений каждого из параметров, полученных по результатам обработки данных каталога обоими алгоритмами, позволяет сделать однозначный вывод о свойствах процесса в фазах активации и релаксации. Таким образом, на основании результатов расчетов можно сделать вывод, что деформационный процесс в рассматриваемой области обладает свойствами нестационарности и слабой эредитарности. Однако отметим, что на полученные результаты влияют выбор критериев, алгоритма и каталога. Использование в качестве пространственного радиуса – радиуса Добровольского, определяет большую область влияния события. Выбор другого радиуса влияния, например, радиуса Миндлина, может значительно сузить область влияния и уменьшить количество событий, связанных с главным ударом, и как следствие уменьшить выборку форшоков или афтершоков. Как указывалось выше, каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН обладает малой статистикой событий, с одной стороны, это связано с естественными причинами редкости достаточно сильных землетрясений, с другой стороны, ограниченным периодом точных инструментальных наблюдений и неполной статистикой слабых землетрясений. Следовательно, изменение или уточнение критериев и алгоритма, расширение каталога или использование более полных каталогов может повысить точность полученных результатов.

Заключение по результатам моделирования

Аппроксимация эмпирического закона распределения времени ожидания форшоков или афтершоков, полученная с помощью трёхпараметрической

функции Миттаг-Леффлёра (1), (2) показала высокую точность приближения (менее 3%).

Порядок вычисленных значений параметра $\tilde{\mu}$ составляет 0.01 – 0.1 и соответствует средним значениям, найденным на основе каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН [45]. Эредитарный параметр ν принимает значения близкие к единице, что характеризует процесс в фазах форшоков и афтершоков как стандартный пуассоновский или близкий к нему. Параметр нестационарности $\tilde{\nu}$ меньше единицы, что указывает на то, что процесс обладает нестационарными свойствами как в фазе активации, так и в фазе релаксации. В целом, деформационный процесс в рассматриваемой области можно охарактеризовать как нестационарный пуассоновский процесс со слабой «памятью» (эредитарностью). Однако для главных ударов классов 12.1 – 12.4 деформационный процесс в фазе афтершоков характеризуется свойствами нестационарности и эредитарности.

На результат численного эксперимента влияет выбор как каталога, так и критериев связности событий, что определяет представительность выборок форшоков или афтершоков, на основании которых вычисляются параметры, характеризующие деформационный процесс.

Выводы

Свойства аномальных физических явлений определяются скейлингом дислокационных изменений критических геодформаций, которые ассоциируются с переходом в турбулентное состояние реологических течений.

Аномальные сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии занимают особое положение среди предвестников землетрясений, поскольку они непосредственно связаны с дислокационными изменениями.

Прогноз землетрясений возможен с вероятностью, определенной в наблюдениях, а поскольку она не равна единице, то всегда будут издержки прогноза.

Основу физики предвестников землетрясений составляет теория критичности геодформаций, три характерных признака и результаты моделирования которой были рассмотрены в этой статье.

Список литературы

1. Shevtsov B., Sheremetyeva O. Fractional models of seismoacoustic and electromagnetic activity // E3S Web Conf., 2017. vol. 20, pp. 020013 DOI: 10.1051/e3sconf/20172002013.
2. Шереметьева О.В. Модель процессов релаксации в различных режимах пластических деформаций // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 2018. Т. 25, № 5, С. 74–82 DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-74-82.
3. Sheremetyeva O., Shevtsov B. Fractional Model of the Deformation Process // Fractal Fract., 2022. vol. 6, no. 7, pp. 372 DOI: 10.3390/fractalfract6070372.
4. Шереметьева О. В., Шевцов В. М. Аппроксимация законов распределения времён ожидания форшоков на основе дробной модели деформационной активности // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 2022. Т. 40, № 3, С. 137–152 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-137-152.
5. Shevtsov B., Sheremetyeva O. Power-Law Compound and Fractional Poisson Process in the Theory of Anomalous Phenomena / *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors*.


- STRPEP 2023*, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, vol. 12. Cham, Switzerland, Springer, 2023, pp. 266–275 DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_27.
6. Shevtsov V., Sheremetyeva O. Fractional Criticality Theory and Its Application in Seismology // *Fractal Fract.*, 2023. vol. 7, no. 12, pp. 890 DOI: 10.3390/fractalfract7120890.
 7. Шереметьева О. В., Шевцов В. М. Приложение эрeditарной модели критичности к исследованию характеристик сейсмического процесса в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2024. Т. 46, № 1, С. 89–102 DOI: 10.26117/2079-6641-2024-46-1-89-102.
 8. Шереметьева О. В., Шевцов В. М. Характеристики деформационного процесса в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги в фазе афтершоков на основе дробной модели деформационной активности // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2024. Т. 49, № 4, С. 50–64 DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-50-64.
 9. Шевцов В. М., Шереметьева О. В. Аномальная диффузия с памятью в теории критичности // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2024. Т. 49, № 4, С. 220–230 DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-220-230.
 10. Sheremetyeva O. V. Hereditarian properties of foreshock distributions in the framework of a fractional model of the deformation process / *Hereditary Models of Dynamic Processes in Geospheres*, Mathematics of Planet Earth, vol. 12. Cham, Switzerland, Springer, 2024, pp. 69–82 DOI: 10.1007/978-3-031-70114-6.
 11. Burridge R., Knopoff L. Model and theoretical seismicity // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1967. vol. 57, no. 3, pp. 341–371.
 12. Shevtsov V. M. Relaxation oscillations in energy active zones // *E3S Web Conf.*, 2020. vol. 196, pp. 02026 DOI: 10.1051/e3sconf/202019602026.
 13. Дружин Г. И., Марапулец Ю. В., Чернева Н. В., Исаев А. Ю., Солодчук А. А. Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке // *Доклады академии наук*, 2017. Т. 472, № 5, С. 584–589.
 14. Луковенкова О. О., Малкин Е. И., Мищенко М. А., Солодчук А. А. Аномалии перед камчатскими землетрясениями ($M_L \geq 4.75$) в сигналах электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии в 2013 году // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2021. Т. 34, № 1, С. 75–87 DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-75-87.
 15. Пархоменко Э. И. *Явления электризации в горных породах*. М.: Наука, 1968. 256 с.
 16. Titova M. A., Zakharov V. I., Pulnits A. S. Interpretation of Ionospheric Disturbances During the Largest Earthquake by the Using the Differentiated Approach for the Special Methods to Processing Satellite Radio Signals // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2022. vol. 62, no. 6, pp. 783–801 DOI: 10.1134/S0016793222060159.
 17. Богданов В. В., Павлов А. В. Динамика поведения ионосферных параметров накануне землетрясений в периоды 28.02.–01.03.2013г. и 19.05–24.05.2013г // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2018. Т. 22, № 2, С. 85–99 DOI: 10.26117/2079-6641-2018-22-2-85-99.
 18. Богданов В. В., Павлов А. В. Построение на основе сейсмических и ионосферных прогностических признаков методики оценки области временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2020. Т. 30, № 1, С. 59–78 DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-59-78.
 19. Мандрикова О. В., Полозов Ю. А. Метод выделения аномальных особенностей в данных критической частоты ионосферы на основе совмещения вейвлет- преобразования и нейронных сетей // *Цифровая обработка сигналов*, 2012. № 2, С. 29–35.
 20. Rodkin M. V., Liperovskaya E. V. On the Difference in Physical Mechanisms of Earthquakes at Different Depths and Their Ionospheric Response // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2023. vol. 59, pp. 377–390 DOI: 10.1134/S1069351323030114.
 21. Bychkov V. V., Korsunova L. P., Smirnov S. E., Hegai V. Anomalies in the ionosphere and electricity of the surfacelayer of the atmosphere before the Kamchatka earthquake of 30.01.2016 according to the Paratunka Observatory // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017. vol. 57, no. 4, pp. 532–540 DOI: 10.1134/S0016793217040053.
 22. Denisenko V. V., Ampferer M., Biernat H. K. Ionospheric conductivity effects on the electric field penetration from the atmosphere into the ionosphere // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008. vol. 8, no. 5, pp. 57–60 DOI: 10.5194/nhess-8-1009-2008.

23. Denisenko V. V., Boudjada M. Y., Horn M., Pomozov E. V., Biernat H. K., Schwingenschuh K., Lammer H., Prattes G., Cristea E. Ionospheric conductivity effects on electrostatic field penetration into the ionosphere // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008. vol. 8, no. 5, pp. 1009–1017 DOI: 10.5194/nhess-8-1009-2008.
24. Poklad Yu. V., Ermak V. M., Gavrilov B. G., Ryakhovskiy I. A. Variations in the parameters of the signal from the A1F3 VLF transmitter received at the Mikhnevo Geophysical Observatory during a series of earthquakes in Turkey in February 2023 / *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023*, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham, Switzerland, Springer, 2023, pp. 179–185 DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_27.
25. Муллаяров В. А., Абзалетдинова Л. М., Аргунов В. В., Корсаков А. А. Вариации параметров грозных электромагнитных сигналов на трассах, проходящих над областями землетрясений // *Геомagnetизм и астрономия*, 2011. Т. 51, № 6, С. 841–851.
26. Аргунов В. В., Муллаяров В. А. О проявлении землетрясений в сигналах атмосфериков // *Успехи современного естествознания*, 2010. № 8, С. 29.
27. Smirnov S. E. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008. vol. 8, no. 5, pp. 745–749 DOI: 10.5194/nhess-8-1009-2008.
28. Липеровская Е. В., Парро М., Богданов В. В., Мейстер К. В., Родкин М. В., Липеровский В. А. Об инфракрасном излучении в атмосфере перед землетрясениями // *Геофизические исследования*, 2008. № 8, С. 51–68.
29. Беляков А. С., Лавров В. С., Николаев А. В., Худзинский Л. Л. Подземный фоновый звук и его связь с приливными деформациями // *Физика Земли*, 1999. № 12, С. 39–46.
30. Гаврилов В. А., Пантелеев И. А., Рябинин Г. В. Физическая основа электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // *Физика Земли*, 2014. № 1, С. 89–103.
31. Марापудец Ю. В., Щербина А. О. Оценка ориентации оси наибольшего сжатия пород с использованием точечной приемной системы на основе комбинированного приемника // *Акустический журнал*, 2018. Т. 64, № 6, С. 703–711.
32. Gapeev M. I., Solodchuk A. A. Mathematical Model of the Formation of Geoacoustic Emission Zones in the Elastic Approximation of the Medium / *Parovik R., Zunnunov R. T. (eds) Hereditary Models of Dynamic Processes in Geospheres*, Mathematics of Planet Earth, vol. 12. Cham, Switzerland, Springer, 2024, pp. 109–120 DOI: 10.1007/978-3-031-70114-6_6.
33. Гапеев М. И., Солодчук А. А. Моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2024. Т. 49, № 4, С. 171–184 DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-171-184.
34. Gapeev M. I., Marapulets Yu. V., Solodchuk A. A. Orientation of the Principal Stress Axes as a Possible Cause of Geoacoustic Radiation Anisotropy during Earthquake Preparation // *Geodynamics and Tectonophysics*, 2025. Т. 16, № 5, С. 0846 DOI: 10.5800/GT-2025-16-5-0846.
35. Huang F., Liu J., Kopylova G., Martinelli G., Mokhtari M., Singha Roy P. N. Editorial: From preparation to faulting: multidisciplinary investigations on earthquake processes, volume II // *Front. Earth Sci.*, 2024. vol. 12, pp. 1467641 DOI: 10.3389/feart.2024.1467641.
36. Копылова Г. Н., Любушин А. А., Таранова Л. Н. Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // *Российский сейсмологический журнал*, 2021. Т. 3, № 1, С. 75–91 DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.05.
37. Parovik R. I., Shevtsov B. M., Firstov P. P. A model of radon (^{222}Rn) transport in the superdiffusion mode in a fractal medium // *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*, 2008. vol. 10, no. 2, pp. 79–85.
38. Janossy L., Renyi A., Aczel J. On composed Poisson distributions // *I. Acta Math. Acad. Sci. Hungar.*, 1950. no. 1, pp. 209–224.
39. Adelson R. M. Compound Poisson distributions // *Oper. Res. Quart.*, 1966. vol. 17, pp. 73–75.
40. Antonio Di Crescenzo, Barbara Martinucci, Alessandra Meoli A fractional counting process and its connection with the Poisson process // *ALEA, Lat. Am. J. Probab. Math. Stat.*, 2016. no. 13, pp. 291–307 DOI: 10.30757/ALEA.v13-12.
41. Beghin L., Macci C. Multivariate fractional Poisson processes and compound sums // *Adv. in Appl. Probab.*, 2016. vol. 48, no. 3 DOI: 10.1017/apr.2016.23 author.


42. Khandakar M., Kataria K. K. Some Compound Fractional Poisson Processes // *Fractal Fract.*, 2023. vol. 7, no. 1, pp. 15 DOI: 10.3390/fractalfract7010015.
43. Kanamori Hiroo The Energy Release in Great Earthquakes // *J. of Geophysical Research*, 1977. vol. 82, no. 20, pp. 2981–2987.
44. Gutenberg B., Richter C. F. Frequency of Earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944. vol. 34, pp. 185–188.
45. *The Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences. Available online: <http://www.gsras.ru/new/eng/catalog/>.*
46. Bak P., Christensen K., Danon L., Scanlon T. Unified scaling law for earthquakes // *Phys. Rev. Lett.*, 2002. vol. 88, no. 17, pp. 178501–11785014.
47. Carbone V., Sorriso-Valvo L., Harabaglia P., Guerra I. Unified scaling law for waiting times between seismic events // *Europhys. Lett.*, 2005. vol. 71, no. 6, pp. 1036–1042 DOI: 10.1209/epl/i2005-10185-0.
48. Riga G., Balocchi P. Short-term earthquake forecast with the seismic sequence hierarchization method // *Open Journal of Earthquake Research*, 2016. vol. 5, pp. 79–96 DOI: 10.4236/ojer.2016.52006.
49. Shevtsov B. M., Sagitova R. N. Statistical analysis of seismic processes on the basis of the diffusion approach // *Doklady Earth Sciences*, 2009. vol. 426, no. 1, pp. 642–644 DOI: 10.4236/ojer.2016.52006.
50. Dobrovolsky I. R., Zubkov S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pageoph.*, 1979. no. 117, pp. 1025–1044.

Информация об авторах



Шевцов Борис Михайлович ✉ – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории электромагнитного излучения ИКИР ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0003-0625-0361.



Шереметьева Ольга Владимировна ✉ – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории моделирования физических процессов ИКИР ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-9417-9731.

References

- [1] Shevtsov B., Sheremetyeva O. Fractional models of seismoacoustic and electromagnetic activity, E3S Web Conf., 2017, vol. 20, no. 02013, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20172002013
- [2] Sheremetyeva O.V. Model relaxation processes in the different modes of plastic deformation. Vestnik KRAUNC, Fiz.-mat. nauki, 2018, 25: 5, pp. 74–82. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-74-82
- [3] Sheremetyeva O., Shevtsov B. Fractional Model of the Deformation Process, Fractal Fract., 2022, vol. 6, no. 7, pp. 372. DOI: 10.3390/fractalfract6070372
- [4] Sheremetyeva O. V., Shevtsov B. M. Approximation of the waiting times distribution laws for foreshocks based on a fractional model of deformation activity, Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki, 2022, 40: 3, 137–152. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-137-152
- [5] Shevtsov B., Sheremetyeva O. Power-Law Compound and Fractional Poisson Process in the Theory of Anomalous Phenomena. In: Dmitriev A., Lichtenberger J., Mandrikova O., Nahayo E. (eds) Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham, 2023, pp. 266–275. DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_27
- [6] Shevtsov B., Sheremetyeva O. Fractional Criticality Theory and Its Application in Seismology, Fractal Fract., 2023, vol. 7, no. 12, pp. 890. DOI: 10.3390/fractalfract7120890
- [7] Sheremetyeva O. V., Shevtsov B.M. Application of the hereditarian criticality model to the study of the characteristics of the seismic process of the Kuril-Kamchatka Island arc subduction zone, Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki, 2024, 46: 1, 89-102. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-46-1-89-102
- [8] Sheremetyeva O. V., Shevtsov B.M. Characteristics of the deformation process in the subduction zone of the kuril-kamchatka island arc in the aftershock phase based on a fractional model of deformation activity, Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki, 2024, 49: 4, pp. 50–64. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-50-64
- [9] Shevtsov B. M., Sheremetyeva O. V. Anomalous diffusion with memory in criticality theory, Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki, 2024, 49: 4, 220–230. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-220-230
- [10] Sheremetyeva O. V. Hereditarian properties of foreshock distributions in the framework of a fractional model of the deformation process. In: Parovik, R., Zunnunov, R.T. (eds.) Hereditary Models of Dynamic Processes in Geospheres, Mathematics of Planet Earth, vol. 12, pp. 69–82. Springer, Cham, Switzerland (2024) DOI: 10.1007/978-3-031-70114-6
- [11] Burridge R., Knopoff L. Model and theoretical seismicity, Bulletin of the Seismological Society of America, 1967, vol. 57, no. 3, pp. 341–371.
- [12] Shevtsov B. M. Relaxation oscillations in energy active zones, E3S Web Conf., 2020, vol. 196, pp. 02026. DOI: 10.1051/e3sconf/202019602026
- [13] Druzhin G.I., Marapulets Yu.V., Cherneva N.V., Isaev A.Yu., Solodchuk A.A. Acoustic and electromagnetic radiation before the earthquake in Kamchatka, Reports of the Academy of Sciences (Russian: Doklady Akademii Nauk), 2017, vol. 472, no. 5, pp. 584–589.
- [14] Lukovenkova O.O., Malkin E.I., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A. Anomalies before the Kamchatka earthquakes ($ML \leq 4.75$) in electromagnetic radiation and geoacoustic emission signals in 2013, Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki, 2021, 34: 1, pp. 75–87. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-75-87
- [15] Parkhomenko E.I. The phenomena of electrification in rocks. Moscow, Nauka Publ., 1968, 256 p.


- [16] Titova M.A., Zakharov V.I., Pulinets A.S. Interpretation of Ionospheric Disturbances During the Largest Earthquake by the Using the Differentiated Approach for the Special Methods to Processing Satellite Radio Signals, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2022, vol. 62, no. 6, pp. 783–801. DOI: 10.1134/S0016793222060159
- [17] Bogdanov V.V., Pavlov A.V. Dynamics of the behavior of ionospheric parameters on the eve of earthquakes in the periods 02/28/2013 and 05/19/24/2013, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2018, 22: 2, pp. 85–99. DOI: 10.26117/2079-6641-2018-22-2-85-99
- [18] Bogdanov V.V., Pavlov A.V. Construction based on seismic and ionospheric prognostic features of a methodology for estimating the area of the waiting period for strong Kamchatka earthquakes, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2020, 30: 1, pp. 59–78. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-59-78
- [19] Mandrikova O.V., Polozov Yu.A. A method for identifying anomalous features in ionospheric critical frequency data based on a combination of wavelet transform and neural networks, *Digital signal processing. — Moscow: RNTORES*, 2012, no. 2, pp. 29–35.
- [20] Rodkin M. V., Liperovskaya E. V. On the Difference in Physical Mechanisms of Earthquakes at Different Depths and Their Ionospheric Response. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2023, vol. 59, pp. 377–390. DOI: 10.1134/S1069351323030114
- [21] Bychkov V.V., Korsunova L.P., Smirnov S.E., Hegai V. Anomalies in the ionosphere and electricity of the surface layer of the atmosphere before the Kamchatka earthquake of 30.01.2016 according to the Paratunka Observatory, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 532–540. DOI: 10.1134/S0016793217040053
- [22] Denisenko V. V., Ampferer M., Biernat H. K. Ionospheric conductivity effects on the electric field penetration from the atmosphere into the ionosphere, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, vol. 8, no. 5, pp. 57–60. DOI: 10.5194/nhess-8-1009-2008
- [23] Denisenko V. V., Boudjada M. Y., Horn M., Pomozov E. V., Biernat H. K., Schwingenschuh K., Lammer H., Prattes G., Cristea E. Ionospheric conductivity effects on electrostatic field penetration into the ionosphere, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, vol. 8, no. 5, pp. 1009–1017. DOI: 10.5194/nhess-8-1009-2008
- [24] Poklad Yu.V., Ermak V.M., Gavrilov B.G., Ryakhovskiy I.A. Variations in the parameters of the Signal from the A1F3 VLF Transmitter Received at the Mikhnevo Geophysical Observatory During a Series of Earthquakes in Turkey in February 2023, *International Conference Solar-terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors*, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 2023, pp. 179–185. DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_27
- [25] Mullayarov V.A., Abzaletdinova L.M., Argunov V.V., Korsakov A.A. Variations in parameters of thunderstorm electromagnetic signals on routes passing over earthquake areas, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, vol. 51, no. 6, pp. 841–851.
- [26] Argunov V. V., Mullayarov V. A. O proyavlenii zemletryasenij v signalax atmosferikov, *Uspexi sovremennogo estestvoznaniya*, 2010, no. 8, pp. 29–29.
- [27] Smirnov S.E. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2008, no. 8, pp. 745–749. DOI: 10.5194/nhess-8-1009-2008
- [28] Liperovskaya E.V., Parro M., Bogdanov V.V., Meister K.V., Rodkin M.V., Liperovsky V.A. On infrared radiation in the atmosphere before earthquakes, *Geophysical research*, 2008, no. 8, pp.51–68.
- [29] Belyakov A.S., Lavrov V.S., Nikolaev A.V., Khudzinsky L.L. Underground background sound and its relation to tidal deformations, *Physics of the Earth*, 1999, no. 12, pp. 39–46.

- [30] Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V. The physical basis of electromagnetic influence on the intensity of geoacoustic processes, *Physics of the Earth*, 2014, no. 1, pp. 89–103.
- [31] Marapulets Yu. V., Shherbina A. O. Ocenka orientacii osi naibol'shego szhatiya porod s ispol'zovaniem tochechnoj priemnoj sistemy' na osnove kombinirovannogo priemnika, *Akusticheskij zhurnal*, 2018, vol. 64, no. 6, pp. 703–711
- [32] Gapeev M. I., Solodchuk A. A. Mathematical Model of the Formation of Geoacoustic Emission Zones in the Elastic Approximation of the Medium, Parovik, R., Zunnunov, R. T. (eds) *Hereditary Models of Dynamic Processes in Geospheres*, 12, *Mathematics of Planet Earth*, Cham, Switzerland, Springer, 2024, 109–120 DOI: 10.1007/978-3-031-70114-6_6
- [33] Gapeev M. I., Solodchuk A. A. Modelirovanie napravleniya osey glavny'x napryazhenij gorny'x porod pri podgotovke zemletryasenij, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2024, 49: 4, pp. 171–184 DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-171-184
- [34] Gapeev M. I., Marapulets Yu. V., Solodchuk A. A. Orientation of the Principal Stress Axes as a Possible Cause of Geoacoustic Radiation Anisotropy During Earthquake Preparation, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2025, vol. 16, no. 5, pp. 0846 DOI: 10.5800/GT-2025-16-5-0846
- [35] Huang F., Liu J., Kopylova G., Martinelli G., Mokhtari M., Singha Roy PN Editorial: From preparation to faulting: multidisciplinary investigations on earthquake processes, volume II, *Front. Earth Sci.*, 2024, vol. 12, pp. 1467641. DOI: 10.3389/feart.2024.1467641
- [36] Kopylova G.N., Lyubushin A.A., Taranova L.N. A new predictive technology for analyzing variations in low-frequency seismic noise (using the example of the regions of the Russian Far East), *Russian Seismological Journal*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 75–91. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.05
- [37] Parovik R.I., Shevtsov B.M., Firstov P.P. A model of radon (^{222}Rn) transport in the superdiffusion mode in a fractal medium, *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 79–85.
- [38] Janossy L., Renyi A., Aczel J. On composed Poisson distributions, *I. Acta Math. Acad. Sci. Hungar.*, 1950, no. 1, pp. 209–224.
- [39] Adelson R. M. Compound Poisson distributions, *Oper. Res. Quart.*, 1966, vol. 17, pp. 73–75.
- [40] Antonio Di Crescenzo, Barbara Martinucci, Alessandra Meoli A fractional counting process and its connection with the Poisson process, *ALEA Lat. Am. J. Probab. Math. Stat.*, 2016, no. 13, pp. 291–307. DOI: 10.30757/ALEA.v13-12
- [41] Beghin L., Macci C. Multivariate fractional Poisson processes and compound sums, *Adv. in Appl. Probab.*, 2016, vol. 48, no. 3. DOI: 10.1017/apr.2016.23
- [42] Khandakar M., Kataria K. K. Some Compound Fractional Poisson Processes, *Fractal Fract.*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 15. DOI: 10.3390/fractalfract7010015
- [43] Kanamori Hiroo The Energy Release in Great Earthquakes, *J. of Geophysical Research*, 1977, vol. 82, no. 20, pp. 2981–2987.
- [44] Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of Earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, vol. 34, pp. 185–188.
- [45] The Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences. figshare <http://www.gsras.ru/new/eng/catalog>
- [46] Bak P., Christensen K., Danon L., Scanlon T. Unified scaling law for earthquakes, *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, no. 17, pp. 178501–11785014
- [47] Carbone V., Sorriso-Valvo L., Harabaglia P., Guerra I. Unified scaling law for waiting times between seismic events, *Europhys. Lett.*, 2005, vol. 71, no. 6, pp. 1036–1042. DOI: 10.1209/epl/i2005-10185-0


- [48] Riga G., Balocchi P. Short-term earthquake forecast with the seismic sequence hierarchization method, *Open Journal of Earthquake Research*, 2016, vol. 5, pp. 79–96. DOI: 10.4236/ojer.2016.52006
- [49] Shevtsov B. M., Sagitova R. N. Statistical analysis of seismic processes on the basis of the diffusion approach, *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 642–644. DOI: 10.4236/ojer.2016.52006
- [50] Dobrovolsky I. R., Zubkov S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pageoph.*, 1979, no. 117, pp. 1025–1044

Information about the authors



Shevtsov Boris Mikhailovich ✉ – D. Sci. (Phys. & Math.), Professor, Major Researcher, Electromagnetic Radiation Laboratory, IKIR FEB RAS, Paratunka, Kamchatka, Russia,  ORCID 0000-0003-0625-0361.



Sheremetyeva Olga Vladimirovna ✉ – PhD (Tech.), Research Scientist, Laboratory of Physical Process Modeling, IKIR FEB RAS, Paratunka, Kamchatka, Russia,  ORCID 0000-0001-9417-9731.