© Авторы 2024 г. Открытый доступ. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2024. Open access. Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.343(571.642)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.161-173 (In English) https://www.elibrary.ru/nbfges (In English) http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-3-1.pdf

О возможной связи между магнитными бурями и землетрясениями в определенных тектонических условиях (на примере о. Сахалин)*

А. С. Закупин[®], А. И. Казаков, Н. С. Стовбун, С. А. Гуляков, М. Ю. Андреева, О. А. Жердева [®]E-mail: a.zakupin@imgg.ru Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В работе рассмотрены актуальные вопросы геофизики, связанные с возможным влиянием возмущений в магнитосфере на сейсмичность. Исследование проведено на детальном каталоге сейсмических событий южного Сахалина для периода с 2003 по 2023 г. В работе поставлена задача проверить предположение о том, что такое влияние может проявиться в отдельных сейсмогенных зонах в период их близости к разрядке. Проверка осуществлена в произвольно взятых сегментах Западно-Сахалинского (ЗСР) и Центрально-Сахалинского (ЦСР) разломов. В них выявлены совпадения моментов некоторых сейсмических событий (с M > 2.7) и магнитных бурь с высоким индексом (G1 и выше). Для выделения периодов, когда сегменты разломов находятся в субкритическом напряженно-деформированном состоянии, используется метод LURR (load-unload response ratio). Показано, что основная часть совпадений выпала на периоды повышенной аномальной активности параметра LURR.

Ключевые слова: землетрясение, магнитная буря, LURR, корреляция, сегмент разлома

On the possible relationship between magnetic storms and earthquakes in certain tectonic conditions (using the example of Sakhalin Island)**

Aleksander S. Zakupin[®], Artem I. Kazakov, Nikolai S. Stovbun, Sergei A. Gulyakov, Marina Yu. Andreeva, Olga A. Zherdeva

[@]E-mail: a.zakupin@imgg.ru Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The paper considers topical issues of geophysics related to the possible influence of disturbances in the magnetosphere on seismicity. The study was conducted based on a detailed catalog of seismic events in southern Sakhalin for the period from 2003 to 2023. The paper aims to test the assumption that such an influence can manifest itself in individual seismogenic zones during their proximity to discharge. The testing was carried out in randomly selected segments of the West Sakhalin (WSF) and Central Sakhalin (CSF) faults. The coincidence of the moments of some seismic events (with M > 2.7) and magnetic storms with a high index (G1 and higher) was revealed in these segments. The LURR (load-unload response ratio) method was used to identify periods when fault segments were in a subcritical stress-strain state. It was shown that the main part of the coincidences occurred during the periods of increased abnormal activity of the LURR parameter.

Keywords: earthquake, magnetic storm, LURR, correlation, fault segment

^{*} Перевод данной статьи на английский язык напечатан в журнале «Геосистемы переходных зон», 2024, т. 8, № 3, с. 161–173. https://doi. org/10.30730/gtrz.2024.8.3.161-173; https://www.elibrary.ru/nbfges

^{**} The full text of this article in English published in the «Geosystems of Transition Zones» journal, 2024, vol. 8, No. 3, pp.[Electronic resources]. https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.000-000; https://www.elibrary.ru/nbfges

Для цитирования: Zakupin A.S., Kazakov A.I., Stovbun N.S., Gulyakov S.A., Andreeva M.Yu., Zherdeva O.A. On the possible relationship between magnetic storms and earthquakes in certain tectonic conditions (using the example of Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 3, pp. 161–173. https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.161-173; https://www. elibrary.ru/nbfges [The translation from Russian: Закупин А.С., Казаков А.И., Стовбун Н.С., Гуляков С.А., Андреева М.Ю., Жердева О.А. О возможной связи между магнитными бурями и землетрясениями в определенных тектонических условиях (на примере о. Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 3. [Electronic resources]. http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-3-1.pdf]

Введение

Вопрос о связи магнитосферы и упругого поля Земли, изменения в котором приводят к разрушению геосреды и движениям, проявляющимся в виде сейсмических колебаний, всегда был на повестке дня и актуальности не потерял и по сей день. Результат в подобных исследованиях во многом определяется качеством и размером выборки сейсмических событий. Рассмотрим состояние дел в этой сфере путем анализа недавних публикаций.

Интересный результат был получен в работе [1]. Авторы проверяли гипотезу о существовании связи между землетрясениями (M = 4 - 4.9) и солнечной активностью за период 2006-2012 гг. Данные о землетрясениях были взяты из ANNS базы данных (Калифорния), а данные о ежедневной солнечной активности и магнитосферы – из OMNIWeb (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/). Для поиска взаимосвязи авторы построили обобщенные модели с экзогенными переменными (generalized autoregressive model with exogenous variables. GARX), где экзогенные переменные - это параметры, отражающие потенциальные триггеры землетрясений (межпланетное магнитное поле, Dst-индекс, скорость солнечного ветра, количество солнечных пятен, электрическое поле Земли). В результате математического алгоритма были получены коэффициент детерминации и критерий Шварца, параметры которых указывают на связь солнечной активности с землетрясениями с магнитудой M = 4-4.9. В то же время авторы отмечают, что результаты данного алгоритма при обработке землетрясений с магнитудой M > 5 дают обратный результат – отсутствие связи с солнечной активностью.

А.В. Гульельми с соавторами [2] по данным каталога Национального информационного центра о землетрясениях Геологической службы США (USGS) рассматривали землетрясения по всей планете с 1973 по 2010 г. с магнитудами $M \ge 5$. (От себя отметим неочевидность решения о применении столь старых данных по землетрясениям с небольшой магнитудой.) Были рассмотрены 405 землетрясений, которые происходили в течение 1 ч до и 1 ч после 1113 магнитных бурь с внезапным началом (SSC, storm sudden commencement – резкое увеличение Н-компоненты геомагнитного поля, которое происходит почти одновременно на всей Земле). Активная фаза непосредственно самих геомагнитных бурь в этой работе не анализировалась. В итоге было обнаружено эмпирическое подтверждение связи между землетрясениями и SSC, а именно понижение глобальной сейсмичности после SSC. В то же время авторы утверждают, что теоретическая интерпретация связи SSC с землетрясениями отсутствует.

В работе [3] был проведен поиск связи геомагнитных возмущений (Dst-индекс, абсолютное значение возмущенности поля | ΔX |, абсолютное значение вариабельности поля |dX/dt|) и землетрясений для региона Аляски (геомагнитная станция «College») в период 2014-2016 гг. Основой исследований служил каталог сейсмических событий Геологической службы США. Сначала была изучена статистика геомагнитных вариаций до и после землетрясений разных классов: сильные (M > 5), слабые мелкие (3 < M < 5, H < 5 км), слабые поверхностные (3 < M < 5, H = 5–10 км), слабые неглубокие (3 < M < 5, H > 10 км) и выбранные случайным образом. Другим подходом стало изучение количества землетрясений разных классов до и после начала суббурь. Оба подхода не подтвердили гипотезу о триггерном воздействии магнитных бурь на землетрясения. В то же время отмечено, что подобное воздействие может происходить только при совокупности уникальных благоприятных факторов, которые сложно выявить в статистике. По поводу уникальных факторов хотелось бы добавить, что статья вышла в 2020 г. и авторы просто не знали, что в 2021 г. на Аляске произойдет мегаземлетрясение с M = 8.2. Более того, так интересующая авторов [3] триггерная сейсмичность (например, от геомагнитной активности) могла бы проявиться в период неустойчивости развития сейсмического процесса, и по нашим данным (по методу LURR), полученным в работе [4], этот период наступил только с августа 2019 г.

В работе [5] с использованием анализа наложения эпох и Z-теста была найдена связь между Dst-индексом и землетрясениями $M \ge 7$ (USGC). Результат показал большее количество геомагнитных бурь перед сейсмическими событиями, чем после них, при этом отмечена более тесная корреляция с поверхностными землетрясениями. При этом отсутствует точное объяснение такого феномена. Это может быть связано с особенностями проявления обратного пьезоэлектрического эффекта именно в приповерхностном слое.

Авторы [6] утверждают, что им удалось найти корреляцию между солнечным ветром и сильными землетрясениями с M > 5.6. Для землетрясений использовался каталог ISC-GEM, а данные по солнечному ветру взяты из каталога SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). В ходе анализа было установлено, что солнечная активность является триггером для возникновения сейсмических событий высоких классов в условиях критического напряжения структур или при совместном влиянии других эффектов, например обратных пьезоэлектрических эффектов.

В работе [7] сопоставлены сильнейшие магнитные бури (Kp > 7, Ap-индекс) и все 935 землетрясений ($M \ge 6.5$) мира в период 1994–2017 гг. (USGS). Из всех 49 сильнейших бурь в этот период выявлено 17 случаев, когда сейсмические события возникли в то же время, что и буря, или на следующие сутки. При этом 14 из них произошли в районе Японии и на югозападе Тихого океана, но почти отсутствуют в континентальной части Азии, Северной и Южной Америке. Авторы предполагают, что

это может быть связано с меньшей устойчивостью литосферы восточного полушария.

Другая работа [8] подтверждает отсутствие корреляции между солнечной активностью (Dst-индекс) и глобальной сейсмичностью $(M \ge 4)$ с 1996 по 2016 г. (USGS). Не обнаружив связи за более длительный период, авторы [8] проанализировали поверхностные землетрясения ($M \ge 4$, $H \le 70$ км) и уровень Dst-индекса отдельно за 2004 г., где корреляция также не была обнаружена. В то же время выборка сейсмически активных периодов в разных локальных зонах (юго-восток Индонезии, Тайвань, восточная часть Японии, юг Аляски, запад Мексики, запад Чили) показывает резкое изменение уровня Dst-индекса в периоды увеличения количества землетрясений. Самое большое изменение зафиксировано в Индонезии за период сейсмической активности 9-13 ноября 2004 г.: уровень Dst-индекса упал до -373 нТл. Самое слабое изменение (-124 нТл) обнаружено во время резкого увеличения количества землетрясений 8 сентября 2007 г. в Мексике.

Таким образом, многочисленные примеры из литературы показывают, скорее, отсутствие корреляции, чем ее наличие. Однако мы также видим, что в рассмотренных работах разные выборочные подходы и сопоставление результатов не всегда даст объективные оценки. В целом есть стремление к глобальности (охватить больший период, большие регионы), но стоит учитывать, что парадигма «чем больше выборка землетрясений, тем значимее статистика» здесь может и не работать. Ведь очевидно, что магнитные бури если и способны выступить в качестве триггера для землетрясений, то никак не генерировать их. В большинстве публикаций проводится только статистический анализ связи геомагнитной активности и сейсмических событий, в то время как механизм воздействия остается нераскрытым.

Авторы [9, 10] представили теоретическую модель и расчеты возмущения электрического поля, электрического тока и выделения тепла в литосфере. Было выяснено, что плотность теллурических токов, генерируемых солнечными вспышками, сопоставима с плотностью тока от искусственных источников (МГД-генератор «Памир-2», ЭРГУ-600) [11], которые повлияли на сейсмичность Памира и Северного Тянь-Шаня [12]. При этом отмечается, что триггерное воздействие зависит не только от напряженно-деформированного состояния области подготовки землетрясения, но и от времени нарастания фронта вспышки, а также уровня проводимости в слое литосферы. Для подтверждения подобной идеи (триггерного влияния на сейсмичность) в случае с солнечными вспышками был проведен статистический анализ глобальной (каталог USGS, $M \ge 4$) и региональной (Греция, каталог EMCS, *M* ≥ 3) сейсмичности в период солнечной вспышки класса Х9.3 6 сентября 2017 г. [13]. Количество землетрясений (±10 дней от солнечной вспышки) увеличилось по отношению к фону на 68 % для глобальной сейсмичности и на 120 % для региональной. Возникает важный вопрос о состоянии геосреды, степени ее подготовки к эффективному взаимодействию с внешним источником для диссипации накопленной ранее энергии. В работе [14] показано, что при взаимодействии электромагнитного и упругого полей триггерные эффекты в горных породах возможны лишь в области неупругого деформирования на уровнях порядка 85 % и выше от максимального уровня сопротивления приложенной нагрузке. В этом же диапазоне (за точкой пропорциональности) предполагается триггерный отклик среды на внешнее воздействие и для масштаба земной коры в целом. Например, такой подход реализован в методе выявления областей с околокритическим состоянием напряжений и среднесрочного прогноза землетрясений LURR. Более того, гипотеза о зонах, находящихся в субкритическом напряженно-деформированном состоянии и чувствительных к воздействию пульсаций геомагнитного поля, уже была высказана ранее и частично подтверждена в работе [15]. В этой работе показан отклик сейсмичности в афтершоковых зонах сильных землетрясений, где вследствие перестройки напряженно-деформированного состояния коры после основного толчка постоянно возникают зоны субкритических напряжений.

На различных масштабных уровнях (планетарный, региональный) в одной выборке могут оказаться землетрясения, которые происходят одновременно, но в разных зонах:

в релаксирующих (со значительной афтершоковой активностью), нейтральных (умеренная сейсмичность в очагах на стадии накопления напряжений) и, наконец, в очаговых, находящихся в нестабильном состоянии (околокритические уровни напряжений). В одной отдельно взятой выборке допустимо наличие всех этих разноэтапных землетрясений, но лишь в эволюционной форме, когда одно состояние сменяет другое, а для этого работать необходимо в отдельно взятых сейсмогенных зонах. Правда, есть одна проблема – идеально выделить такие зоны геометрически бывает непросто. Также никогда нельзя сказать о полной независимости очаговой зоны. Разломные зоны бывают не только протяженными до сотен километров, но и могут на своем протяжении физически контактировать с другими разломами. Однако на картах сейсмической активности существуют участки с наибольшим количеством землетрясений («темные» пятна), поэтому их можно считать «почти» независимыми очаговыми областями. В нашей недавней работе [16] мы проводили исследование как раз в рамках такой вот отдельной сейсмогенной зоны. Было обнаружено, что в одном из сегментов Апреловского разлома (юг острова Сахалин) почти за три месяца (с июля по октябрь 2023 г.) все землетрясения (два из двух) с M > 3 попали в периоды магнитных бурь с G1 и выше или после вспышек Х-класса. Всего геомагнитные возмущения попадали только на 9 дней из 80, и очевидно, что здесь статистика определенно в пользу существования связи. Более того, в работе [17] мы также показали проявление подготовки одного из этих двух землетрясений в изменениях электротеллурических потенциалов. Соответственно, представляет интерес выявить возможные связи геомагнитной активности с землетрясениями при определенных условиях. Для этого, в том числе, предлагается использовать методы выявления периодов времени, в которые очаговая зона могла бы находиться в уязвимом по отношению к внешним воздействиям состоянии.

Методы

В качестве основы для оценки напряженно-деформированного состояния в сейсмогенной зоне предлагается методика LURR. Метод LURR (Load/Unload Response Ratio) был разработан китайскими сейсмологами в 1990-х годах [18]. Название метода можно перевести с английского как «отношение отклика среды на нагрузку/разгрузку». Метод опирается на непротиворечивые модели теории упругости (модель абсолютно жесткой Земли) и механики разрушения (критерий Кулона-Мора). Основной посыл состоит в том, что за пределами упругого деформирования среды реакция на нагрузку не соответствует реакции на разгрузку (и условное отношение откликов становится отличным от единицы). Со временем это несоответствие только усиливается – вплоть до потери устойчивости разрушающегося объекта. Метод предполагает решение уравнений теории упругости для определения компонент тензора напряжений на площадке, где расположен слип-вектор. Расчеты выполняются для каждого землетрясения в каталоге. При этом рассчитываются смещения от приливного воздействия в заданной точке (эпицентр землетрясения). Использование в методе лунно-солнечных приливов оправдано тем, что другого такого идеального откалиброванного индикатора нагрузки/разгрузки в геосреде найти невозможно. Тектоническая и литостатическая компоненты не учитываются, так как скорости их изменения на порядки отличаются от приливных. Для разделения землетрясений на «нагрузочные» и «разгрузочные» проводится расчет критерия Кулона-Мора. Если землетрясение произошло во время роста значения этого критерия, то оно определяется как «положительное», в противном случае как «отрицательное». Исследуемый параметр (LURR) отождествляется с отношением суммарной деформации Беньоффа всех положительных землетрясений к тому же показателю отрицательных землетрясений за некоторый промежуток времени (в математической обработке это величина скользящего окна). В упругопластических средах перед разрушением наблюдается явление текучести, когда при неизменных напряжениях деформация продолжает расти. Очевидно, что при таком положении вещей расчет отношения отклика на нагрузку к отклику на разгрузку не имеет смысла (реакции как таковой нет), а математически параметр LURR снова становится близким к единице.

В области перехода от упругого к неупругому деформированию этот параметр начнет расти и вблизи разрушения среды достигнет своих максимальных значений. Именно поэтому в среде, где реализуется хрупкое разрушение, можно ожидать главное (прогнозируемое) событие после выхода кривой на максимальные значения, а в среде, где возможно проявление пластических эффектов, возникает возврат параметра к фоновому уровню и некоторая задержка (временной лаг с момента определения прогнозного признака, вариации LURR) по времени. Очевидно, что эта задержка зависит от геологических условий. Метод LURR очень подробно излагается в оригинальных работах [18], поэтому мы ограничились лишь качественным описанием. Отметим, что проведенные нами исследования позволяют положительно оценивать возможности данного метода (см., например, обзор [19]).

Перед тем как изучать связи в отдельных сейсмогенных зонах (основная цель работы), представим общий анализ сейсмичности для южного Сахалина в сравнении с геомагнитной активностью. Понимая, что в этом случае сейсмогенерирующие сегменты двух основных линеаментов (Западно-Сахалинского (ЗСР) и Центрально-Сахалинского (ЦСР) разломов) будут в одной выборке, мы не будем искать связь с геомагнитной активностью для конкретных землетрясений. Здесь будет уместно просто отметить характерные точки в изменении рядов, а также выявить (при наличии) тренды. Геомагнитная активность в пространстве будет неизменной при любой сейсмической выборке, и ее будем оценивать по интенсивности (Кр-индекс). Геомагнитный индекс (Кр) представлен на сайте Лаборатории солнечной астрономии Института космических исследований РАН и Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (https://xras.ru/magnetic storms.html). В приведенных там гистограммах содержится информация о динамике изменения планетарного Кр-индекса. На основе данного индекса рассчитана также шкала G интенсивности геомагнитного шторма.

Для исследования отдельных сейсмогенных зон мы взяли в качестве объектов участки ЗСР и ЦСР, которые показаны прямоугольниками на карте разломов на рис. 1. Исследование выполняли в следующей последовательности. Построили кривую, определяющую периоды неустойчивости по методу LURR, и после этого оценили корреляцию во времени значимых уровней индекса Кр с землетрясениями. Проявлением свидетельства наличия связи считали факты, если землетрясение произошло в момент бури или сутки после нее. Одни сутки – это некоторый условный период для предполагаемого триггерного эффекта (который должен проявиться в максимально короткий срок). Мы выбрали этот период, несмотря на вероятность существования задержки от нескольких суток до нескольких недель (по оценкам различных авторов), в первую очередь потому, что эти задержки лишь продукт статистики в отдельных исследованиях, они не имеют за собой подтвержденных физических механизмов. В методе LURR, который, правда, не избежал критики [21], используется прямой переход (всё в рамках механических явлений) и оценка влияния триггерного эффекта от при-

a) Кинематика 48° разлом сбросы взбросы **№**1 надвиги левые сдвиги правые сдвиги сложная кинематика 47° 10 0 10 20 30 40 км 469 142° 143° 144° 1419 б) B) 48° 48 47° 46° 5.0 - 6.2 5.0 - 6.24.0 - 4.9 3.0 - 3.9 2.8 - 2.9 4.0 - 4.9 3.0 - 3.9 2.0 - 2.9 пубине H 0 - 9.9 i 10 - 19.9 20 - 29.9 141 142° 1439 1449 141 1439 144°

Рис. 1. (а) Карта разломов по [20] с указанием зон исследования (№ 1 – сегмент ЗСР; № 2 – Апреловский разлом ЦСР); окружности (одна частично) – расчетные области LURR в соответствии с индексом зоны; (б) (в) землетрясения на юге Сахалина с 2003 по 2023 г. из полного каталога (б), с M > 2.7(в). Прямоугольниками обозначены зоны исследования. Координаты зон (углы прямоугольников): № 1: 46.7N, 142.4E – 47.3N, 142.7E; № 2: 46.4N, 141.5E – 47N, 141.8E.

Fig. 1. a) Map of faults according to [20] indicating study zones (No. 1, segment of the WSF; No. 2, Aprelovsky fault of the CSF); circles (one partially) indicate LURR calculation areas in accordance with the zone index; b), c) earthquakes in the south of Sakhalin from 2003 to 2023 from the full catalog (b), with M > 2.7) (c). Rectangles indicate study zones. Zone coordinates (corners of rectangles): No. 1, 46.7N, 142.4E – 47.3N, 142.7E; No. 2, 46.4N, 141.5E – 47N, 141.8E.

ливного фактора производится де факто в момент подвижки, что, по крайней мере, не делает наш выбор совсем безосновательным.

Теперь к вопросу о выборке, т.е. землетрясения с какими характеристиками следует учитывать. Логично было бы брать землетрясения с минимальной магнитудой по уровню представительности каталога (для улучшения статистики), но она отражает всего лишь возможности сети. Хотелось бы иметь физическое обоснование для выбора порога. Если предположить, что влияние бурь существенно лишь на этапе нестабильного очага (с высоким уровнем внутренней энергии), то можно пойти также по пути аналогии с методикой LURR, где параметр хорошо коррелировал с подготовкой сильных землетрясений (*M* > 5). Применяя этот метод, мы использовали для расчетов умеренную сейсмичность с M = 3.3-5, при этом в большинстве случаев понижение порога до M = 3 не ухудшало результата. Соответственно, для оценки бурь и землетрясений можно попробовать несколько вариантов, причем взять нижний порог с запасом (несколько вариантов с M < 3). В исследовании мы будем рассматривать пять вариантов, где выборки включают землетрясения с магнитудами $M \ge 2.7/2.8/2.9/3/3.1.$

Для анализа корреляций сейсмичности с геомагнитной активностью был использован каталог землетрясений юга Сахалина с 2003 по 2023 г., который составляется в ИМГиГ ДВО РАН на основе официальных ежегодных сборников ФИЦ ЕГС РАН. В работе мы также выполнили декластеризацию каталога с помощью программы, описанной в [22]. В алгоритм программы заложен метод локального отношения интенсивностей (ЛОИ) [23]. В декластеризованном каталоге из 10 771 событий осталось 6179.

Результаты и обсуждение

Представляет интерес построить общие для всего периода графики сейсмической активности по всей выборке, т.е. по всему южному Сахалину, и затем сравнить их с графиком активности геомагнитного индекса Кр. За двадцатилетний период мы видим как минимум два 11-летних максимума солнечной активности, и, конечно же, активизации сейсмичности (на южном Сахалине с 2003 по 2023 г. произошло 4 землетрясения с M > 5). Графики сейсмической активности построены для оригинального и декластеризованного каталогов (рис. 2).

Сейсмическая активность имеет тенденцию к увеличению после пиков геомагнитной активности на снижающемся тренде. Самое сильное сейсмическое событие для этого периода (Невельское землетрясение 02.08.2007, M = 6.2) произошло после сильнейшей активизации магнитосферы в 2004–2005 гг., когда за 2 года было зафиксировано 138 магнитных бурь (в этот период проходил пик 11-летней солнечной активности). Надо отметить, что программа декластеризации деформирует активность 2007–2008 гг., и лучше делать выводы по оригинальному каталогу. Наблюдаемое



Рис. 2. Распределение во времени (мм.гггг) скорости накопления количества землетрясений N (сейсмической активности, dN/dt) (синяя линия – оригинальный каталог, красная – декластеризованный) и геомагнитного индекса Кр в период с 2003 по 2023 г.

Fig. 2. Time distribution (mm.yyyy) of the accumulation rate of the number of earthquakes N (seismic activity, dN/dt) (blue line denotes original catalogue, red line denotes declustered catalogue) and geomagnetic index Kp in the period from 2003 to 2023.

увеличение средней фоновой по активности с 2011 г. может быть объяснено тем, что с 2011 г. сейсмическая сеть стала полностью цифровой, а количество станций увеличилось, что привело к увеличению числа событий малых классов в каталоге. В целом отметим, что графики на рис. 2 не выявляют однозначно наличие/отсутствие связи между землетрясениями и магнитными бурями.

Теперь перейдем к выборкам для отдельных зон № 1 (сегмент ЗСР) и № 2 (Апреловский разлом). Нас особенно интересуют периоды, когда параметр LURR будет в аномальной области (>3). Для построения графиков LURR выборки в пределах зон, очерченных прямоугольниками на рис. 1, недостаточны, и расчет проводился в круговых областях с радиусом в один градус (рис. 1 а). Круг в районе ЗСР смещен западнее ЗСР, чтобы уйти от влияния ЦСР, а вот для второго круга вариантов отклонения нет и влияние ЗСР мы, вероятно, должны увидеть в любом случае. Графики показаны на рис. 3.

Теперь проведем подсчет совпадений времени землетрясений с моментами сильнейших магнитных бурь (момент бури плюс сутки после нее). Результаты представим для 5 выборок землетрясений (см. таблицу). В 2003 г. в обеих выборках землетрясений не было.

Выделим на всем периоде исследования наиболее важные события. Итак, максимумы геомагнитной активности по числу экстремальных бурь приходятся на 2004–2006, 2015–2017 гг. и, вероятно, будут ожидаться в 2026–2028 гг., что отражает 11-летний цикл

солнечной активности (см. таблицу). Аномалии параметра LURR в районе Апреловского разлома наблюдались в июне 2023 (рис. 4 а), а в районе ЗСР – в мае 2007, июле 2015 и июне 2023 г. (рис. 4 б). Отметим совпадение аномалий для двух линеаментов в 2023 г. и вернемся к этому позже. Для ЗСР аномалии LURR в 2007 и в 2015 гг. – это предвестники важных сейсмических событий: Невельского, 02.08.2007, M = 6.2, Ohopckoro, 16.08.2016,M = 5.8, и Крильонского, 23.04.2017, M = 5. Если первое произошло непосредственно на выбранном участке, то Онорское и Крильонское севернее и южнее в пределах этого линеамента, а аномалии 2015-2016 гг. наблюдались на всем протяжении ЗСР по Сахалину [19]. Несмотря на большое количество землетрясений в 2007 г. (см. таблицу), все они произошли уже после 2 августа и с аномалией в мае не пересекаются. Совпадения 2006 и 2007 гг. в зоне № 1 пришлись на активную фазу афтершоковой активности после Горнозаводского (17.08.2006, M = 5.6) и Невельского землетрясений. Остальные совпадения из таблицы пришлись на 2013-2015 гг., а также один раз фиксировались в 2020 г. Совпадения отмечались преимущественно для землетрясений небольшой магнитуды, и если для M > 2.7 их было 9 за 20 лет, то для M > 3.1 их количество меньше почти в четыре раза. Получается, что в 2006-2007 гг. для выделенного фрагмента ЗСР небольшое количество совпадений при высокой сейсмической активности (в том числе афтершоковой) все-таки приходится на аномальный период LURR (рис. 4). При этом наибольший



Рис. 3. Графики изменения параметра LURR в круговых областях расчета радиусом один градус и координатами: (a) 47E, 142.5N (для зоны № 2); (б) 46.7E, 141N (для зоны № 1). Красной линией выделен порог отсечки аномалий, равный 3. Fig. 3. Graphs of LURR parameter changes in circular calculation areas with a radius of one degree and coordinates: (a) 47E, 142.5N (for zone No. 2); (b) 46.7E, 141N (for zone No. 1). The red line indicates the anomaly cutoff threshold equal to 3.

Таблица. Соотношение количества землетрясений (числитель), совпавших по времени с моментами магнитных бурь (знаменатель)

Table. The ratio of the number of earthquakes (numerator) coinciding in time with the moments of magnetic storms (denominator)	o) bp (c)1101101	141 05	10)												
(denominator)	Table.	The 1	ratio	of the	e number	of	earthquakes	(numerator)	coinciding	in	time	with	the	moments	of magnetic	storms
	(denon	ninato	r)													

Год	Бури G1 и выше	M > 2.7	M > 2.8	M > 2.9	M > 3	M > 3.1					
Зона 1											
2004	63	3 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0					
2005	75	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0					
2006	43	5 / 1	4 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0					
2007	35	337 / 3	282 / 3	247 / 3	198 / 2	173 / 0					
2008	23	25 / 0	20 / 0	18 / 0	14 / 0	12 / 0					
2009	4	10 / 0	7 / 0	6 / 0	4 / 0	3 / 0					
2010	20	15 / 0	13 / 0	11 / 0	6 / 0	6 / 0					
2011	31	2 / 0	1 / 0	1 / 0	0 / 0	0 / 0					
2012	36	7 / 0	5 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0					
2013	24	11 / 2	6 / 2	3 / 1	2 / 1	2 / 1					
2014	27	3 / 1	2 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0					
2015	81	4 / 1	4 / 1	3 / 1	3 / 1	1 / 0					
2016	67	1 / 0	1 / 0	1 / 0	0 / 0	0 / 0					
2017	66	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0					
2018	26	11 / 0	10 / 0	6 / 0	4 / 0	3 / 0					
2019	18	3 / 0	2 / 0	2 / 0	2 / 0	0 / 0					
2020	12	3 / 1	2 / 1	2 / 1	2 / 1	2 / 1					
2021	30	5 / 0	4 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0					
2022	61	3 / 0	2 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0					
2023	45	1 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0					
	Всего	449 / 9	367 / 7	311 / 6	243 / 5	208 / 2					
			Зона 2		1	1					
2004	63	5 / 2	4 / 2	3 / 2	3 / 2	3 / 2					
2005	75	2 / 1	2 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1					
2006	43	23 / 0	21 / 0	17 / 0	16 / 0	13 / 0					
2007	35	13 / 3	11 / 3	9 / 1	4 / 0	2 / 0					
2008	23	10 / 4	10 / 4	10 / 4	8 / 2	7 / 2					
2009	4	2 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0					
2010	20	4 / 0	3 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0					
2011	31	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0	2 / 0					
2012	36	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0					
2013	24	23 / 5	18 / 4	14 / 4	13 / 4	12 / 4					
2014	27	5 / 0	5 / 0	4 / 0	4 / 0	1 / 0					
2015	81	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0	2 / 0					
2016	67	3 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0					
2017	66	5 / 0	5 / 0	4 / 0	3 / 0	3 / 0					
2018	26	4 / 0	4 / 0	2 / 0	2 / 0	2 / 0					
2019	18	5 / 0	5 / 0	4 / 0	3 / 0	3 / 0					
2020	12	5 / 0	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0					
2021	30	4 / 0	3 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0					
2022	61	3 / 1	1 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0					
2023	45	5/3	5/3	3 / 2	2 / 2	1 / 1					
	Всего	137 / 21	121 / 19	93 / 16	74 / 12	60 / 11					

Примечание. Выделены годы, когда землетрясения совпадали по времени с моментами магнитных бурь. *Note.* Years when earthquakes coincided in time with the moments of magnetic storms are highlighted.

процент совпадений для зоны № 1 приходится на 2013–2015 гг., и это совпадает не только с максимумом солнечной активности, но опять же и с самой сильной аномалией LURR (рис. 4).

Сейсмическая активность выделенной области № 2 в три раза меньше, чем в районе ЗСР. Здесь наблюдается высокий процент совпадений в 2003-2005 гг., причем в большинстве случаев это события с магнитудой *M* > 3.1. Также высокий процент совпадений в 2022 и 2023 гг., но магнитуда совпавших землетрясений уже пониже. В 2007 и 2008 гг. процент совпадений в разы ниже при повышенной сейсмичности после Невельского землетрясения и, вероятно, при перераспределении нагрузки в структурах ЦСР, куда относится Апреловский разлом. Совпадения в 2013 г. во многом обусловлены высокой сейсмической активностью, и здесь, прежде всего, нужно отметить рой землетрясений с 15 по 25 мая (в этот период попала буря 18 мая), в ходе которого только землетрясений с М = 2.8–3.9 произошло 9. И это почти половина от цифры, указанной в таблице. Кстати, программы декластеризации если не удаляют полностью землетрясения в роях, то искажают каталоги с таковыми очень сильно, именно поэтому для поиска совпадений мы использовали оригинальный каталог, в отличие от графиков сейсмической активности, где были оба варианта (рис. 2). С 2013 по 2022 г. совпадений не было совсем, а за 2022-2023 их 4 из 8, т.е. 50 %. При этом единственная аномалия параметра LURR в зоне № 2 отмечена в 2023 г., и это интересно с точки зрения рассматриваемой задачи об избирательной чувствительности среды к внешним воздействиям.

Возникает вопрос по поводу отсутствия на графике LURR (рис. 3) аномалий в 2003-2005 гг., ведь в эти годы процент совпадений такой же (см. таблицу). Вероятный ответ на рис. 4, где показаны карты из работы [19]. Аномалии в круговых областях в 2004–2005 гг. вроде бы обходят стороной Апреловский разлом. Однако, по всей видимости, зона имела определенный запас энергии. Этим и объясняется то, что после разгрузки в 2006 и 2007 гг. сегмента Западно-Сахалинского разлома в районе г. Невельск Апреловский разлом почти сразу же после перераспределения нагрузки в сентябре 2007 г. сгенерировал сильное землетрясение с M = 5. ЗСР и ЦСР находятся на небольшом расстоянии, и многие процессы идут на них в общем ключе, хотя и в разной порой последовательности. Например, Такойский рой 2001 г. в районе Апреловского разлома происходит через год после Углегорского землетрясения 2000 г. (ЗСР), а после Невельского землетрясения (ЗСР) в том же районе (Апреловский разлом) через месяц происходит землетрясение с M = 5. В 2013 г. наоборот – рой землетрясений в мае 2013 г. в районе Апреловского разлома предшествовал землетрясению на ЗСР в ноябре 2013 г. (рис. 4 а).



Рис. 4. (а) Карта сильнейших землетрясений на юге Сахалина с 1997 по 2019 г.; (б) карта с аномальными зонами LURR на юге Сахалина с 2004 по 2005 г.

Fig. 4. a) Map of the strongest earthquakes in the south of Sakhalin from 1997 to 2019; b) map with anomalous LURR areas in the south of Sakhalin from 2004 to 2005.

Совпадение аномалий LURR для двух линеаментов в середине 2023 г. является довольно необычным и первым подобным случаем за исследуемый период. Возникает вопрос о вероятных последствиях таких проявлений для сейсмического процесса на юге Сахалина.

Важные события в сейсмическом процессе также хорошо отражаются на кривых накопления периодов (аналога активности). Как наиболее характерный пример приведем такой график для мыса Крильон, где ЗСР и ЦСР не только максимально сближаются, но и имеют общий секущий латеральный разлом (рис. 5 а). В этом районе на ЗСР произошли сильные землетрясения в 2006 и 2013 гг. (рис. 4 а), а график точно передает этапы развития очагов – стационарного режима накопления землетрясений, главного события и релаксации.

Здесь мы также видим выход кривой с накопления в рост перед Крильонским землетрясением 2017 г. Но это показательный пример, на который хорошо ложится все, включая моменты появления аномалий LURR. На рис. 5 б показан график для выделенной зоны Апреловского разлома (см. рис. 1), здесь в силу отсутствия сильных землетрясений этапы менее выражены. Впрочем, они присутствуют в сентябре 2006 и мае 2013 г., что говорит о координированной вовлеченности обоих линеаментов в единый процесс. Причем в первом случае имела место реакция на Горнозаводское землетрясение, а во втором в 2013 г. рой произошел

за 6 мес. до землетрясения 2013 г. в прол. Лаперуза на ЗСР (рис. 4 а). С 2014 г. здесь идет накопление, и это необычно, потому что Апреловский разлом относительно регулярно «работает» преимущественно роями (сентябрь 2001 -Такойский рой, сентябрь 2006, май 2013) с магнитудами умеренного характера. Единственное событие относительно большой магнитуды (M = 5), не являющееся частью роя, произошло в сентябре 2007 г., и всего через месяц после Невельского землетрясения. Отметим, что Невельское землетрясение (M = 6.2) на южном Сахалине, по самым скромным меркам, является самым сильным за последние пятьдесят лет. Ибо Монеронское землетрясение (6.09.1971, M = 7.5), которое географически от Сахалина недалеко, не относится к структурам ЗСР. Таким образом, совсем не удивительно, что землетрясение 2007 г. оказало влияние на соседние с Западно-Сахалинским разломом структуры. В стадии накопления сейчас находится и выделенный нами сегмент ЗСР (рис. 5 в). Здесь же выделяются главные события на ЗСР в 2007 и 2013 гг. Судя по графикам (рис. 5), землетрясение в апреле 2017 г. (Крильонское, M = 5), эпицентр которого расположился на субширотном секущем разломе между ЗСР и ЦСР, не оказало влияния на рассматриваемые нами сегменты и эффект от него был узко локализованным. Этот факт позволяет считать весьма вероятной разрядку сейсмогенных зон на обоих разломах в 2024-2025 гг.



Рис. 5. Кривые накопления периодов (N – число сейсмических событий) для эпицентральной области Крильонского землетрясения с 2005 по 2017 г. (а), для сегментов ЦСР (Апреловский разлом) (б) и ЗСР (в) с 2003 по 2023 г. R – процесс затухания сейсмической активности (релаксация), S – процесс стационарной активности, стрелка – аномалия параметра LURR.

Fig. 5. Period accumulation curves (N, number of seismic events) for the epicentral area of the Krilyon earthquake from 2005 to 2017 (a), for segments of the CSF (Aprelovsky fault) (b) and WSF (c) from 2003 to 2023. R, attenuation process of seismic activity (relaxation); S, process of stationary activity; arrow indicates anomaly of the LURR parameter.

Заключение

Приведенное исследование справедливо для относительно небольшой сейсмически активной области. В отдельно взятых сегментах Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов в 2003–2023 гг. наблюдаются совпадения моментов отдельных сейсмических событий (с M > 2.7) и магнитных бурь с высоким индексом (G1 и выше).

Основная часть совпадений приходится на периоды повышенной аномальной активности параметра LURR и предшествует появлению сильных землетрясений. То есть мы видим совпадения событий в определенные периоды времени, которые оказываются знаковыми для обоих процессов (геомагнитного и сейсмического). Даже при самом благоприятном для совпадения случае, когда количество дней с бурями достигает четверти от дней в году, вероятность каждого землетрясения совпасть с ними очень невелика. Тем более эта вероятность близка к нулю в 2023 г. для района Апреловского разлома (зона № 2), когда буря происходила в среднем раз в 10 дней, а землетрясений в выборке было всего 5. Однако именно в 2023 г. мы получили самый яркий результат, исключающий поведение обоих параметров как независимых, и, видимо, стоит вернуться к данному вопросу через год-два.

Одним из итогов работы считаем также получение потенциального неблагоприятного прогноза землетрясения с M > 5 для пары ЦСР–ЗСР в южной части о. Сахалин на 2024– 2025 гг. (для ЗСР магнитуда может быть существенно выше).

Список литературы

- Qin P., Yamasaki T., Nishii R. 2014. Statistical detection of the influence of solar activities to weak earthquakes. *Pacific Journal of Mathematics for Industry*, 6(6). https://doi.org/10.1186/s40736-014-0006-9
- Гульельми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л. 2015. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения. *Солнечно-земная физика*, 1(1): 98–103. https:// doi.org/10.12737/5694; EDN: VHATNJ
- Козырева О.В., Пилипенко В.А. 2020. О взаимосвязи геомагнитной возмущенности и сейсмической активности для региона Аляски. *Геофизические исследования*, 21(1): 33–49. DOI: 10.21455/gr2020.1-3

- Закупин А.С., Богинская Н.В. 2022. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на примере сильнейших землетрясений XXI столетия. *Литосфера*, 22(6): 872–881. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881
- 5. Chen H., Wang R., Miao M., et al. **2020.** Statistical study of the correlation between geomagnetic storms and $M \ge 7.0$ global earthquakes during 1957–2020. *Entropy*, 22(11), 1270. https://doi.org/10.3390/e22111270
- Marchitelli V., Harabaglia P., Troise C., et al. 2020. On the correlation between solar activity and large earthquakes worldwide. *Scientific Reports*, 10: 11495. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67860-3
- Соболев Г.А. 2021. Влияние больших магнитных бурь на возникновение больших землетрясений. Физика Земли, 1: 24–40. https://doi.org/10.31857/ S0002333721010087; EDN: XHEZYW
- Takla E.M.H., Samwel S.W. 2023. Possible connection between solar activity and local seismicity. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 34(9). https://doi. org/10.1007/s44195-023-00042-6
- Новиков В.А., Сорокин В.М., Ященко А.К. 2019. Может ли солнечная вспышка инициировать землетрясение? Вестник Объединенного института высоких температур, 3(2): 15–21. https://doi. org/10.33849/2019203; EDN: IYEHAP
- Новиков В.А., Сорокин В.М., Ященко А.К., Мушкарев Г.Ю. 2023. Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки. Динамические процессы в геосферах, 15(1): 23–44. https://doi.org/10.2 6006/29490995_2023_15_1_23; EDN: MEMWRN
- Tarasov N.T., Tarasova N.V. 2004. Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses. *Annals of Geophysics*, 47(1): 199–212. https://doi. org/10.4401/ag-32722013
- 12. Зейгарник В.А., Богомолов Л.М., Новиков В.А. 2022. Электромагнитное инициирование землетрясений: полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и физические механизмы (обзор). Физика Земли, 1: 35–66. DOI: 10.31857/S0002333722010100; EDN: VUPKUV
- Novikov V., Ruzhin Yu., Sorokin V.M., Yaschenko A. 2020. Space weather and earthquakes: possible triggering of seismic activity by strong solar flares. *Annals of Geophysics*, 64, 554. https://doi.org/10.4401/ag-7975
- 14. Закупин А.С. 2006. Исследование электростимулированных вариаций акустической эмиссии при деформировании образцов геоматериалов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, НС РАН в г. Бишкек. EDN: NOKZRZ
- 15. Sorokin V., Novikov V. 2024. Possible interrelations of space weather and seismic activity: An implica-

tion for earthquake forecast. *Geosciences*, 14(5), 116. https://doi.org/10.3390/geosciences14050116

- 16. Закупин А.С., Стовбун Н.С., Гуляков С.А. и др. 2024. Проявление геомагнитной активности (солнечные вспышки и бури) в изменении электротеллурических потенциалов по данным измерений на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне. *Геосистемы переходных зон*, 8(2): 91–103. https://doi.org/10.30730/ gtrz.2024.8.2.091-103
- Закупин А.С., Дудченко И.П., Богомолов Л.М. и др. 2024. Кратковременные вариации электротеллурического поля вблизи очага землетрясения на о. Сахалин. Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки, 46(1): 134–164. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164; EDN: FIGWJO
- Yin X.C., Chen X.Zh., Song Zh.P., Yin C. 1995. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145(3–4): 701–715. https://doi.org/10.1007/ bf00879596
- Закупин А.С., Богинская Н.В. 2021. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*, 5(1): 27–45. https://doi. org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045; EDN: PBJTCV
- Каменев П.А., Дегтярев В.А., Жердева О.А., Костров Ю.В. 2024. Кинематика разрывных нарушений Сахалина по геологическим и сейсмологическим данным. *Геосистемы переходных зон*, 8(1): 37–46. https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.037-046
- Ребецкий Ю.Л. 2021. К теории детерминированного прогноза землетрясений методом LURR. *Геосистемы переходных зон*, 5(3): 192–222. https://doi. org/10.30730/gtrz.2021.5.3.192-208.208-222
- 22. Смирнов В.Б. **1997.** Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 4: 93–105.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. 1993. Целевой подход к проблеме идентификации афтершоков. В кн.: Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, вып. 1: 62–69.

References

- Qin P., Yamasaki T., Nishii R. 2014. Statistical detection of the influence of solar activities to weak earthquakes. *Pacific Journal of Mathematics for Industry*, 6(6). https://doi.org/10.1186/s40736-014-0006-9
- Guglielmi A.V., Lavrov I.P., Sobisevich A.L. 2015. Sudden onsets of magnetic storms and earthquakes. *Solar-Terrestrial Physics*, 1(1): 98–103. https://doi. org/10.12737/5694; EDN: VHATNJ
- 3. Kozyreva O.V., Pilipenko V.A. **2020.** On the relationship between geomagnetic disturbance and seismic

activity for the Alaska region. *Geophysical Research*, 21(1): 33–49. https://doi.org/10.21455/gr2020.1-3

- 4. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2022.** Medium-term earthquake forecasts by the LURR method on the example of the strongest earthquakes of the 21st century. *Lithosphere*, 22(6): 872–881. (In Russ.). https://doi. org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881
- 5. Chen H., Wang R., Miao M., et al. **2020.** Statistical study of the correlation between geomagnetic storms and $M \ge 7.0$ global earthquakes during 1957–2020. *Entropy*, 22(11), 1270. https://doi.org/10.3390/e22111270
- Marchitelli V., Harabaglia P., Troise C., et al. 2020. On the correlation between solar activity and large earthquakes worldwide. *Scientific Reports*, 10, 11495. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67860-3
- Sobolev G.A. 2021. The influence of large magnetic storms on the occurrence of large earthquakes. *Physics of the Earth*, 1: 24–40. https://doi.org/10.31857/ S0002333721010087; EDN: XHEZYW
- Takla E.M.H., Samwel S.W. 2023. Possible connection between solar activity and local seismicity. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 34(9). https://doi. org/10.1007/s44195-023-00042-6
- Novikov V.A., Sorokin A.K., Yashchenko A.K. 2019. [Can a solar flare trigger an earthquake?]. Vestnik Obyedinennogo instituta vysokikh temperatur, 2(3): 15– 21. https://doi.org/10.33849/2019203; EDN: IYEHAP
- Novikov V.A., Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Mushkarev G.Yu. 2023. Physical model and numerical estimates of telluric currents generated by X-ray radiation of a solar flare. *Dynamic Processes in Geospheres*, 1(15): 23–44. https://doi.org/10.26006/29490995_202 3_15_1_23; EDN: MEMWRN
- Tarasov N.T., Tarasova N.V. 2004. Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses. *Annals of Geophysics*, 1(47): 199–212. https:// doi.org/10.4401/ag-32722013
- Zeigarnik V.A., Bogomolov L.M., Novikov V.A. 2022. Electromagnetic initiation of earthquakes: field observations, laboratory experiments, and physical mechanisms (review). *Physics of the Earth*, 1: 35–66. https://doi. org/10.31857/S0002333722010100; EDN: MEMWRN
- Novikov V., Ruzhin Y., Sorokin V.M., Yaschenko A.
 2020. Space weather and earthquakes: possible triggering of seismic activity by strong solar flares. *Annals of Geophysics*, 64(5): 554. https://doi.org/10.4401/ag-7975
- Zakupin A.S. 2006. Issledovaniye elektrostimulirovannykh variatsiy akusticheskoy emissii pri deformirovanii obraztsov geomaterialov [Study of electrically stimulated variations of acoustic emission during deformation of geomaterial samples]: extended abstr. of diss. ... Cand. Sci. (Phys. and Math.). Moscow, NS RAS in Bishkek. EDN: NOKZRZ

- Sorokin V., Novikov V. 2024. Possible interrelations of space weather and seismic activity: An implication for earthquake forecast. *Geosciences*, 14(5), 116. https://doi.org/10.3390/geosciences14050116
- Zakupin A.S., Stovbun N.S., Gulyakov S.A., et al. 2024. The manifestation of geomagnetic activity (solar flares and storms) in the change of electrotelluric potentials according to measurements at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site. *Geosystems of Transition Zones*, 8(2): 91-103. https://doi.org/10.30730/ gtrz.2024.8.2.091-103
- Zakupin A.S., Dudchenko I.P., Bogomolov L.M., et al. 2024. Short-term variations of the electrotelluric field near the source of the earthquake on the Sakhalin Island. *Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 46(1): 134–164. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164; EDN: FIGWJO
- Yin X.C. Chen X.Zh., Song Zh.P., Yin C. 1995. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145: 701–715. https://doi.org/10.1007/ bf00879596

- Zakupin A.S., Boginskaya N.V. 2021. Mid-term earthquake forecasts using the LURR method on Sakhalin: a summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosystems of Transition Zones*, 5(1): 27–45. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045; EDN: PBJTCV
- Kamenev P.A., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A., Kostrov Yu.V. 2024. Kinematics of Sakhalin faults based on geological and seismological data. *Geosystems of Transition Zones*, 8(1): 37–46. https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.037-046
- Rebetsky Yu.L. 2021. To the theory of deterministic earthquake forecasting using the LURR method. *Geo*systems of Transition Zones, 5(3): 192–222. https://doi. org/10.30730/gtrz.2021.5.3.192-208.208-222
- Smirnov V.B. 1997. Experience in assessing the representativeness of earthquake catalog data. *Volcanology* and Seismology, 4: 93–105.
- Molchan G.M., Dmitrieva O.E. 1993. A targeted approach to the problem of aftershock identification. In: *Seismicity and Seismic Zoning of Northern Eurasia*. Moscow: OIEP RAS, vol. 1: 62–69.

Об авторах

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, лаборатория сейсмологии:

Закупин Александр Сергеевич (https://orcid.org/0000-0003-0593-6417), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, a.zakupin@imgg.ru

Андреева Марина Юрьевна (https://orcid.org/0000-0002-7851-3311), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, andreeva-mu@mail.ru

Жердева Ольга Андреевна (https://orcid.org/0000-0003-4814-0865), старший инженер, o.zherdeva@imgg.ru

Поступила 17.05.2024 Принята к публикации 06.07.2024 Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, отдел исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов Центра коллективного пользования:

Казаков Артем Иванович (https://orcid.org/0000-0002-1378-185X), ведущий инженер, legn@inbox.ru

Стовбун Николай Сергеевич (https://orcid.org/0009-0004-1927-798X), младший научный сотрудник,

nikolay19972016@gmail.com

Гуляков Сергей Александрович (https://orcid.org/0009-0001-7924-6972), младший научный сотрудник, gulyakov 97@mail.ru