

УДК 550.334,550.34

О СВЯЗИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ГЕОМАГНИТНЫМИ БУРЯМИ

© 2021 г. А. В. Гульельми^{1,*}, Б. И. Клайн^{2,**}, Н. А. Куражковская^{2,***}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Геофизическая обсерватория “Борок” филиал Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия

*E-mail: guglielmi@mail.ru

**E-mail: klb314@mail.ru

***E-mail: knady@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

После доработки 13.05.2021 г.

Принята к публикации 20.05.2021 г.

В ответ на любезное приглашение Редколлегии журнала “Физика Земли” принять участие в дискуссии по методике статистического изучения корреляционных отношений между геофизическими процессами мы произвели небольшое исследование и написали представленную здесь статью. Будучи по преимуществу геомагнитологами, мы сосредоточили внимание на актуальном вопросе о корреляции землетрясений с геомагнитными бурями. Затронут также вопрос о связи землетрясений с сейсмическими шумами. Основной результат нашего анализа состоит в следующем. Корреляция между землетрясениями и магнитными бурями существует объективно. Проблема вполне заслуживает дальнейшего изучения с использованием методов статистической проверки гипотез, причем особое внимание следует уделять четкому разграничению каузальных и акаузальных корреляций.

Ключевые слова: сейсмология, физика землетрясений, геомагнетизм, причина и следствие, теория вероятностей, статистическая проверка гипотез.

DOI: 10.31857/S000233721060028

1. ВВЕДЕНИЕ

В выпуске журнала “Физика Земли” 2021, № 2 на стр. 153 Редколлегия предлагает читателям журнала принять участие в дискуссии и высказаться по широкому кругу вопросов, в частности, о “допустимости в результатах статистических геофизических исследований выводов без строгой проверки соответствующих статистических гипотез”. Принимая приглашение Редколлегии, мы провели небольшое исследование и написали представленную здесь статью.

В разделе 2 мы обсуждаем актуальный вопрос о корреляции землетрясений и магнитных бурь. Существует богатейшая научная литература по данному вопросу. Из недавно опубликованного укажем здесь на статьи [Соболев и др., 2001; Наукава, 2001; Закржевская, Соболев, 2004; Файнберг и др., 2004; Бучаченко, 2019; Гульельми, 2020; Гульельми, Клайн, 2020; Гульельми и др., 2020; Куражковская, 2020; Соболев и др., 2020; Гульельми, Зотов, 2021; Соболев, 2021]. Мы сосредоточим внимание на сравнительном анализе методик корреляционного исследования, представленных в работах [Гульельми и др., 2020; Соболев, 2021]. В разделе 3 мы кратко рассмотрим проблему флуктуаций сейсмичности [Guglielmi,

Klain, 2019; Гульельми, Клайн, 2020; Lyubushin, 2020; Соболев и др., 2020; Любушин и др., 2021]. В заключительном разделе 4 мы приведем ряд методических соображений, связанных с поиском корреляционных отношений между геофизическими процессами.

2. КОРРЕЛЯЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАГНИТНЫХ БУРЬ

При обсуждении этой темы следует, прежде всего, дать ответ на два основных вопроса: 1. Существует ли корреляция объективно на статистически значимом уровне? 2. Если корреляция существует, то каков знак корреляции? Попросту говоря, играют ли магнитные бури роль своего рода “ингибиторов”, или “катализаторов” землетрясений? В двух опубликованных недавно статьях, а именно [Гульельми и др., 2020; Соболев, 2021], дается положительный ответ на первый вопрос. Однако по второму вопросу выводы авторов указанных работ, судя по всему, расходятся. Попытаемся разобраться в сложившемся положении дел.

В работе [Гульельми и др., 2020] экспериментальное исследование произведено методом, в

основе которого лежит, во-первых, описание сейсмической активности с помощью индекса M_g , названного авторами глобальной суточной магнитудой (*global daily magnitude* или сокращенно *GDM*), и, во-вторых, выделение экстремально спокойных (Q) и возмущенных (D) периодов в состоянии геомагнитного поля [Куражковская, 2020]. Индекс M_g , вычисляется по формуле [Гульельми, Клайн, 2020]:

$$M_g = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{\sum_j H_j \exp(\beta M_j)}{\sum_j H_j} \right]. \quad (1)$$

Здесь: $\beta = (3/2)\ln 10$; $j = 1, 2, 3, \dots$ нумерует землетрясения, зарегистрированные в каталоге в течение календарных суток; M_j — магнитуда землетрясения с номером j , указанная в каталоге. Символ Хэвисайда H_j принимает значения 0, если $M_j < M_0$, и 1, если $M_j \geq M_0$, где M_0 — нижняя граница представительной части каталога землетрясений. Информация о землетрясениях представлена в виде ряда 7300 значений *GDM*, вычисленных по формуле (1) за 20-летний период с 1980 по 1999 гг. по данным мирового каталога землетрясений USGS/NEIC Геологической службы США¹. Оказалось, что планетарная активность землетрясений в Q -период заметно выше, чем в D -период. Подчеркнем, что в Q -период отсутствуют геомагнитные бури по определению. Обнаруженное повышение сейсмической активности в экстремально геомагнитно-спокойных условиях косвенно подтверждается анализом 35 сильных землетрясений с магнитудой 8 и выше, произошедших в 1980–2019 гг.

В работе [Соболев, 2021] исследована корреляция сильных землетрясений и сильнейших магнитных бурь в интервале 1994–2017 гг. Обнаружено 50 магнитных бурь, во время которых индекс K_p геомагнитной возмущенности достигал весьма высокого значения: $K_p > 7$. В 17 случаях в течение двух суток после начала бури этого класса в восточном полушарии Земли происходило землетрясение с магнитудой $M_w > 6.5$. Сделан вывод о том, что связь такого рода не является случайной на уровне статистической значимости 95%.

Итак, в обеих работах сделан вывод о корреляции землетрясений и геомагнитных бурь. Однако, если в первой работе утверждается, что сильные землетрясения возникают преимущественно в магнитно-спокойные периоды [Гульельми и др., 2020], то во второй работе говорится о возникновении сильных землетрясений вскоре после сильных магнитных бурь [Соболев, 2021]. По-видимому, эти два высказывания трудно согласуются

друг с другом, и мы не вполне понимаем причину такого расхождения. Возможно, здесь играют роль различия в объеме и характере выборки, в способе селекции материала наблюдений, в методе обработки и в выборе критерия оценки статистических гипотез. Так, или иначе, мы приняли решение произвести небольшое исследование и дополнительно проверить наше утверждение.

В работе [Гульельми и др., 2020] на рис. 2 сопоставлена долговременная вариация сейсмичности с аналогичной вариацией Q -дней. Для проверки стабильности полученного результата мы, во-первых, использовали обновленный каталог землетрясений. Во-вторых, мы сопоставили активность землетрясений не с вариацией Q -дней, а с вариацией активности геомагнитных бурь. Тем самым мы частично приблизились к методологии Г.А. Соболева, который делает акцент на связи землетрясений с магнитными бурями [Соболев, 2021].

Результат представлен на рис. 1. На верхних двух панелях показаны годовые количества магнитных бурь с внезапным началом (а) и всех магнитных бурь (б), которые произошли на интервале 1980–2019 гг. Количество землетрясений с магнитудой $M \geq 5$, значения индекса *GDM* и энтропии показаны на панелях (в), (г) и (д), соответственно.

Информация о геомагнитных бурях взята из Мирового центра данных по солнечно-земной физике (г. Москва)². Дополнительно был использован каталог Kakioka Magnetic Observatory (Япония)³. Проанализировано 1593 геомагнитные бури. При формировании панели (а) из каталогов выбирались бури с внезапным началом. Общее число таких бурь за сорокалетний период равно 382. При формировании панелей (г) и (д) использовались суточные значения *GDM* и энтропии. Всего накоплено 14610 пар значений указанных параметров.

Мы видим, что после 2009 г. существенно уменьшается количество геомагнитных бурь, в то время, как числовые показатели активности землетрясений достигают пиковых значений после 2009 г. Качественно результат вполне соответствует тому, что было обнаружено нами ранее при анализе долговременной вариации геофизических параметров, характеризующих геомагнитную и сейсмическую активность. Особого внимания заслуживает вариация N_{eq} : видно, что понижение количества геомагнитных бурь сопровождается явным повышением сейсмической активности. Это вполне согласуется как с предсказанием, сделан-

¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

² http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/magnetic_storms/

³ <http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/data-viewer/>

ным в работе [Бучаченко, 2019], так и с результатом анализа, представленным в статье [Гульельми и др., 2020].

3. ОБСУЖДЕНИЕ

В литературе широко используются феноменологические модели для описания эволюции сейсмичности и для моделирования многообразия корреляционных связей того или иного землетрясения с другими природными явлениями (см., например, работы [Завьялов и др., 2020; Guglielmi, Klain, 2020]). Важным в феноменологии является принцип интенциональности [Гуссерль, 1998], т.е., в нашем случае, восприятие корреляционного отношения не только как факта, но и факта, обладающего определенным смыслом. В ряде случаев удается придать корреляционной связи физический смысл *каузального* (причинно-следственного) отношения. Так, в работе [Соболев, 2021] приводятся аргументы в пользу идеи о том, что магнитная буря может служить триггером, т.е. своеобразной причиной землетрясения. (Мы отвлекаемся здесь от того очевидного обстоятельства, что существует комплекс необходимых условий, которые также следует рассматривать как причину возникновения землетрясения.) Вместе с тем, не стоит упускать из виду, что даже весьма тесная корреляция может оказаться *акаузальной*. Другими словами, два сильно коррелированных события могут физически быть независимыми друг от друга. Классический пример дает нам известный парадокс Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР), к экспериментальному изучению которого во многих лабораториях мира было приковано внимание физического сообщества в последние годы (см., например, [Ганцевич, Гуревич, 2018]). Объяснение парадокса ЭПР состоит в том, что акаузальная связь между двумя событиями возникает под влиянием некоторого третьего события. Следует особо подчеркнуть, что данная интерпретация применима не только к квантовому, но и к классическим явлениям такого рода (корреляция между магнитной бурей и землетрясением в нашем случае).

Мы осторожно упомянули о возможности акаузальной корреляции землетрясений и магнитных бурь в связи с тем, что после многих десятилетий интенсивного исследования в геофизическом сообществе еще так и не сложилось устойчивого представления о механизме воздействия геомагнитных вариаций на тектонические процессы. Факт существования корреляции не вызывает сомнения, но его физический смысл остается неопределенным. Локальные механизмы пондеромоторного [Гульельми, 1992] и теплового [Файнберг и др., 2004] воздействия электро-

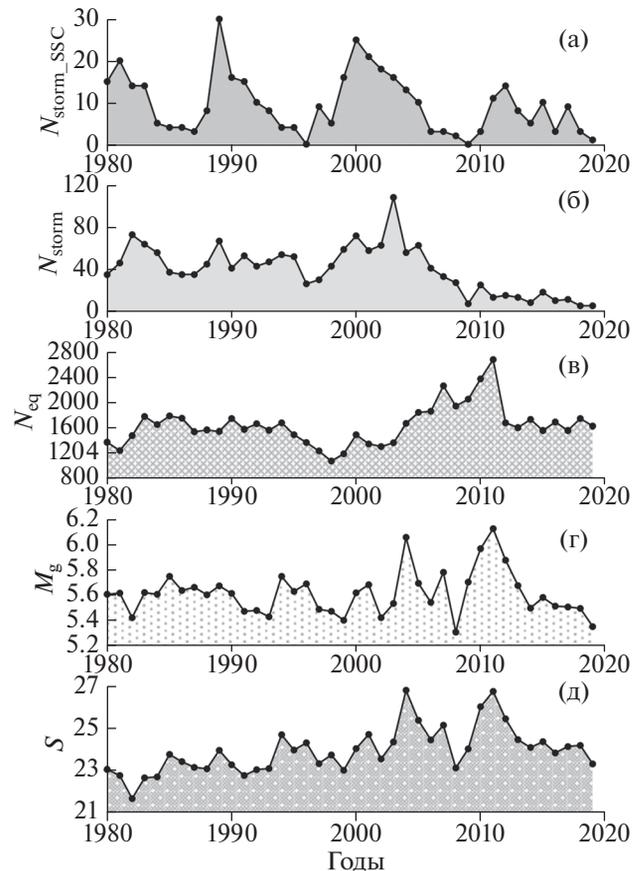


Рис. 1. Долговременная эволюция геомагнитной и сейсмической активности на 40-летнем интервале (1980–2019 гг.): (а) – годовое количество геомагнитных бурь с внезапным началом; (б) – годовое количество всех геомагнитных бурь; (в) – годовое количество землетрясений с магнитудой $M \geq 5$; (г) – годовая величина GDM; (д) – годовая энтропия.

магнитного поля на горные породы неэффективны. Определенные ожидания мы связываем с гипотезой о том, что под действием переменного магнитного поля изменяется пластичность горных пород и это приводит к заметному изменению режима сейсмической активности [Бучаченко, 2019]. Теория [Бучаченко, 2019] предсказывает, в частности, активизацию сильных землетрясений при низкой геомагнитной активности. Результаты нашего исследования [Гульельми и др., 2020] согласуются с этим предсказанием.

Не только магнитные бури, но и другие природные явления, в частности, сейсмические шум рассматриваются на предмет корреляции с землетрясениями. В интересной работе [Любушин и др., 2021] найдена связь сейсмического шума на Камчатке с неравномерностью вращения Земли, которая согласно [Lyubushin, 2020] определенным образом коррелирует с сильными землетрясениями.

Мы обратили внимание и на другую статью этого плана [Соболев и др., 2020]. В ней указано на влияние магнитных бурь на низкочастотный сейсмический шум. Магнитные бури, судя по работам [Гульельми и др., 2020; Соболев, 2021], вероятно влияют также и на активность землетрясений. Вопрос о том, какая конкретная составляющая магнитной бури ответственна за интенсификацию сейсмического шума, остается открытым. Эта проблема обсуждается в работе [Гульельми, Зотов, 2021], так что мы, не углубляясь в детали, отсылаем заинтересованного читателя к указанной работе.

Но вопрос о сейсмических шумах или, в общем плане, о флуктуациях сейсмичности имеет более широкое содержание. В работе [Гульельми, Клайн, 2020] предложено выражать флуктуации планетарной сейсмичности:

$$\langle (\delta M)^2 \rangle = \langle M^2 \rangle - (\langle M \rangle)^2 = \frac{\partial^2 \ln Z}{\partial \beta^2} \quad (2)$$

через статистическую сумму ансамбля землетрясений $Z = \sum_j H_j \exp(-\beta M_j)$ по аналогии с *Zustandssumme*, известной в статистической физике. Здесь угловые скобки означают усреднение по ансамблю, который представляет собой совокупность землетрясений, произошедших на Земле за определенный интервал времени. Выбор интервала времени определяется задачей исследования. Но интервал не должен быть слишком малым, поскольку формула (2) имеет статистический смысл. Индекс $j = 1, 2, 3$, и так далее нумерует землетрясения, зарегистрированные в том или ином мировом каталоге. Величина M_j есть магнитуда землетрясения с номером j , указанная в каталоге.

Мы планируем продолжить исследование флуктуаций сейсмичности. Предварительный анализ свидетельствует, что вариации параметра $\langle (\delta M)^2 \rangle$, судя по всему, содержат информацию не только о сравнительно медленных эндогенных (тектонических) процессах, но и о воздействии на земную кору более быстрых экзогенных факторов, в том числе факторов космического происхождения (см., например, [Зотов и др., 2021]).

Завершая данный раздел, сделаем небольшое замечание по статье [Lyubushin, 2020], о которой мы упомянули выше. С середины 2003 г. в эволюции сейсмических шумов отмечены специфические особенности, а после 2010 г. обнаружена определенного рода дестабилизация шумового процесса. В работе [Lyubushin, 2020] оба явления автор связывает с сильнейшими землетрясениями, которые произошли в 2004 и 2010 гг., а также с высокочастотной аномалией неравномерности вращения Земли. Мы обратили внимание на то

обстоятельство, что возможна альтернативная интерпретация эволюции сейсмических шумов. Действительно, результат анализа геомагнитной возмущенности, представленный в работе [Куражковская, 2020], свидетельствует о том, что в те же годы в околоземном космическом пространстве происходит глобальная перестройка. Она заключается в том, что с 2003 г. начинается аномальное увеличение магнитно-спокойных дней, причем количество таких дней достигает максимума в 2009 г. Иными словами, обнаруженные особенности поведения сейсмических шумов [Lyubushin, 2020] по времени совпадают с экстремально спокойной геомагнитной активностью. Не говорит ли это нам о том, что воздействие космических факторов (Солнца, солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитных вариаций) играет определенную, если не определяющую роль в эволюции сейсмических шумов? На сегодняшний день вопрос остается открытым, но он заслуживает нашего пристального внимания.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наш вклад в дискуссию, предложенную Редколлегией ж-ла “Физики Земли”, мы хотели бы завершить выводом и некоторыми рекомендациями.

1. Корреляция между землетрясениями и магнитными бурями существует объективно. Проблема заслуживает дальнейшего изучения с использованием методов статистической проверки гипотез.

2. Постановка задачи корреляционного исследования должна быть лаконичной и предельно простой. В качестве примера приведем статью [Гульельми и др., 2020], в которой поставлен вопрос о выборе из двух простейших альтернатив — наблюдается или не наблюдается корреляция между глобальной сейсмичностью и глобальной возмущенностью магнитного поля Земли, а для статистически обоснованного выбора использовано специфическое изменение наклона прямой, аппроксимирующей закон Гутенберга—Рихтера, к оси магнитуд.

3. При постановке задачи желательно указывать априорные соображения о том, ожидается ли каузальная или акаузальная корреляция. Насколько это может оказаться важным, свидетельствует история обсуждения в мировой литературе парадокса ЭПР [Ганцевич, Гуревич, 2018]. Многочисленные, технически сложные и дорогостоящие эксперименты, проведенные в недавнее время во многих лабораториях мира, подтвердили предвидение Эйнштейна о существовании сильной корреляции событий, разделенных пространственно-подобным интервалом. Таким образом, факт наличия корреляции событий может

не иметь ничего общего с причинно-следственной связью между ними. Корреляция между двумя событиями может возникнуть под влиянием третьего события, произошедшего в далеком прошлом.

4. Причинно-следственные корреляции представляют для нас особый интерес. Их нелегко выделять, но если это удастся, то исследование целесообразно производить особенно тщательно. Для выделения причинно-следственных корреляций обычно используются те или иные физико-математические модели. Например, модель кругосветного сейсмического эха предсказывает возбуждение сильного афтершока через 3 ч после главного удара землетрясения [Завьялов и др., 2020]. Феноменологическая модель афтершоков [Guglielmi, Klain, 2020] предсказывает вероятное возникновение главного удара при отрицательных значениях коэффициента деактивации очага землетрясения. Примеры такого рода можно продолжить.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 19-05-00574, а также программы государственных заданий № 0144-2014-00116 ГО Борок ИФЗ РАН и государственных заданий ИФЗ РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем искреннюю признательность А.Д. Завьялову, О.Д. Зотову и А.С. Потапову за обсуждение корреляционных связей между геофизическими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бучаченко А.Л. Микроволновое стимулирование дислокаций и магнитный контроль очага землетрясения // УФН. 2019. Т. 189. С. 47–54.
<https://doi.org/10.3367/UFN.2018.03.038301>
- Ганцевич С.В., Гуревич В.Л. Когерентная обменная корреляция в квантовых системах // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. Вып. 1. С. 5–12.
<https://doi.org/10.21883/FTT.2018.01.45281.187>
- Гульельми А.В. Пондеромоторные силы в коре и в магнитосфере Земли // Физика Земли. 1992. № 7. С. 35–39.
- Гульельми А.В. О связи между землетрясениями и геомагнитными возмущениями // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 2. С. 79–84.
<https://doi.org/10.21455/gr2020.2-6>
- Гульельми А.В., Клайн Б.И. О воздействии Солнца на сейсмичность Земли // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 1. С. 111–115.
<https://doi.org/10.12737/szf-61202010>
- Гульельми А.В., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Землетрясения и геомагнитные возмущения // Солнечно-

земная физика. 2020. Т. 6. № 4. С. 93–98.
<https://doi.org/10.12737/szf-64202012>

Гульельми А.В., Зотов О.Д. О геосейсмических шумах и гелиосейсмических колебаниях // Физика Земли. 2021. № 4. С. 142–147.

Гуссерль Э. Картезианские размышления. Пер. с нем. Д.В. Складнева. СПб.: Наука. 1998. 315 с.

Завьялов А.Д., Гульельми А.В., Зотов О.Д. Три проблемы физики афтершоков // Вулканология и сейсмология. 2020. № 5. С. 67–80.
<https://doi.org/10.31857/S0203030620050077>

Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 63–75.

Зотов О.Д., Гульельми А.В., Силина А.С. О возможной связи землетрясений со сменой знака радиальной компоненты межпланетного магнитного поля // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 1. С. 74–83.
<https://doi.org/10.12737/szf-71202108>

Куражковская Н.А. Глобальная возмущенность магнитосферы Земли и ее связь с космической погодой. Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 1. С. 51–62.
<https://doi.org/10.12737/szf-61202005>

Любушин А.А., Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К. Связь мультифрактальных и энтропийных свойств сейсмического шума на Камчатке с неравномерностью вращения Земли // Физика Земли. 2021. № 2. С. 153–163.

Соболев Г.А., Закржевская Н.Л., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С. 6–15.

Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н., Соболев Д.Г., Бойко А.Н. Влияние магнитных бурь на низкочастотный сейсмический шум // Физика Земли. 2020. № 3. С. 3–28.
<https://doi.org/10.31857/S0002333720030096>

Соболев Г.А. Влияние больших магнитных бурь на возникновение больших землетрясений // Физика Земли. 2021. № 1. С. 24–40.
<https://doi.org/10.31857/S0002333721010087>

Файнберг Э.Б., Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Васильева Т.А. Генерация тепловых потоков в недрах Земли мировыми магнитными бурями // Физика Земли. 2004. № 4. С. 54–62.

Guglielmi A.V., Klain B.I. Global magnitude of the earthquakes // Cornell University Library: arXiv:1909.00879v1. 2019

Guglielmi A.V., Klain B.I. The phenomenology of aftershocks // Cornell University Library: arXiv:2009.10999 v1. 2020

Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review // Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan. 2001. V. 121A. P. 893–898.

Lyubushin A. Global Seismic Noise Entropy // Front. Earth Sci. 2020.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.611663>

On the Correlation of Earthquakes with Geomagnetic Storms

A. V. Guglielmi^{a,*}, B. I. Klain^{b,**}, and N. A. Kurazhkovskaya^{b,***}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^b*Geophysical Observatory "Borok," Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, 152742 Russia*

^{*}*e-mail: guglielmi@mail.ru*

^{**}*e-mail: klb314@mail.ru*

^{***}*e-mail: knady@borok.yar.ru*

In response to the kind invitation of the Editorial Board of the journal "Izvestiya, Physics of the Solid Earth" to take part in the discussion concerning the methodology of the statistical study of correlations between geophysical processes, we have done a small research and written this paper. Being predominantly geomagnetologists, we focused on the topical question of the correlation between earthquakes and geomagnetic storms and briefly touched upon the connection of the earthquakes with seismic noise. The main result of our analysis is as follows. A correlation between earthquakes and magnetic storms exists objectively. The problem deserves a further study using statistical hypothesis testing methods, and a special attention should be paid to clearly distinguishing between causal and acausal correlations.

Keywords: seismology, physics of earthquakes, geomagnetism, cause and effect, probability theory, statistical hypothesis testing