

О ВОЗДЕЙСТВИИ СОЛНЦА НА СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ**EFFECT OF THE SUN ON EARTH'S SEISMICITY****А.В. Гульельми***Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, guglielmi@mail.ru***Б.И. Клайн***Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН,
Борок Россия, klb314@mail.ru***A.V. Guglielmi***The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, guglielmi@mail.ru***B.I. Klain***Borok Geophysical Observatory of IPE RAS,
Borok, Russia, klb314@mail.ru*

Аннотация. Для экспериментального исследования связи землетрясений с солнечной активностью введено представление о статистической сумме Z ансамбля землетрясений. Через Z выражается ряд числовых параметров сейсмичности (средняя планетарная магнитуда, энтропия, флуктуации магнитуды), но при этом накладывается жесткое ограничение на магнитуду при формировании ансамбля. Предложен альтернативный метод, не содержащий указанного ограничения, но позволяющий вычислить лишь один числовой параметр, а именно глобальную суточную магнитуду M_g . Вычислено 7300 значений M_g за 20-летний период с 1980 по 1999 г. Сопоставление значений M_g с числами Вольфа W позволило выявить воздействие Солнца на активность землетрясений на статистически значимом уровне.

Ключевые слова: числа Вольфа, землетрясения, магнитуда, закон Гутенберга — Рихтера, статистическая сумма, солнечно-земные связи.

Abstract. For the experimental study of the relationship between earthquakes and solar activity, we introduce the idea of the statistical sum Z of earthquake ensemble. A number of numerical parameters of seismicity (average planetary magnitude, entropy, fluctuations of magnitude) are expressed through Z . A severe restriction is, however, imposed on the magnitude during the formation of the ensemble. We propose an alternative method. It does not have this specific restriction, although it allows us to calculate only one numerical parameter, namely the global daily magnitude M_g . Over the 20-year period from 1980 to 1999, 7300 values of M_g have been calculated. The comparison between the M_g values and Wolf numbers W made it possible to determine the effect of the Sun on earthquakes at a statistically significant level.

Keywords: Wolf numbers, earthquakes, magnitude, Gutenberg-Richter law, statistical sum, solar-terrestrial relations.

ВВЕДЕНИЕ

В физике солнечно-земных связей проблема воздействия солнечной и геомагнитной активности на динамические процессы в земной коре занимает особое место. Обсуждение проблемы продолжается более ста лет, однако до сих пор нет общепринятого мнения о реальности влияния космических факторов на активность землетрясений. Литература на данную тему обширна. Мы ограничимся здесь отдельными ссылками на недавние публикации [Нусамиддинов, 2000; Накаява, 2001; Duma, Ruzhin, 2003; Закржевская, Соболев, 2004; Собисевич, Канониди, Собисевич, 2010; Masci, 2011; Адушкин и др., 2012; Гульельми, Зотов, 2012; Schekotov, 2012; Бучаченко, 2014, 2019; Гульельми и др., 2015; Тарасов, 2019].

Трудность проблемы состоит в том, что до недавнего времени не были известны физические механизмы эффективного воздействия весьма слабых полей космического происхождения на мощные тектонические процессы. Возможным представляется влияние вариаций геомагнитного поля на горные породы, например, токи Фуко, индуцированные в земной коре переменным магнитным полем, приво-

дят к дополнительному нагреву горных пород [Файнберг и др., 2004], хотя не ясно, каким образом такой незначительный нагрев влияет на вероятность возникновения землетрясения. Воздействие может быть и силовым, однако пондеромоторные силы вызывают лишь весьма слабые напряжения и деформации в земной коре [Гульельми, 1992]. Повидимому, макроскопические механизмы — тепловой и силовой — в данном случае неэффективны.

Представленная работа была стимулирована новыми идеями, выдвинутыми в работах [Бучаченко, 2014, 2019]. В их основе лежит представление о магнитопластичности горных пород в естественном залегании, т. е. о изменении пластичности горных пород под действием переменного магнитного поля естественного или искусственного происхождения, что приводит к заметному изменению режима сейсмической активности. В разделе 1 данной статьи мы предлагаем два метода числового описания глобальной сейсмичности. Раздел 2 посвящен анализу связи между глобальной суточной сейсмичностью и солнечной активностью, характеризуемой числами Вольфа. В разделе 3 мы обсуждаем перспективы дальнейших исследований с применением предложенных нами методов.

МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Активность Солнца мы будем характеризовать числами Вольфа W [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. В дополнение к этому нам нужно выбрать числовой показатель сейсмической активности Земли. Мы предлагаем два метода для описания глобальной сейсмичности. Оба метода основаны на представлении об ансамбле землетрясений и в обоих в качестве источника данных используется какой-либо мировой каталог землетрясений, например USGS [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>].

Для совокупности землетрясений, произошедших на Земле за определенный интервал времени, введем представление о статистической сумме Z по аналогии с Zustandssumme, известной в статистической физике:

$$Z = \sum_j H_j \exp(-\eta M_j). \quad (1)$$

Интервал времени выбирается в соответствии с задачей исследования, но он не должен быть слишком малым, поскольку формула (1) имеет статистический смысл. Индекс $j = 1, 2, 3, \dots$ нумерует землетрясения, зарегистрированные в каталоге на выбранном интервале времени. Величина M_j — указанная в каталоге магнитуда землетрясения с номером j . Символ Хэвисайда H_j принимает значения 0, если $M_j < M_0$, и 1, если $M_j \geq M_0$. О выборе магнитуды M_0 и параметра η будет сказано ниже.

Через Z выражаются энтропия

$$S = \ln Z + \eta < M > \quad (2)$$

и средняя планетарная магнитуда землетрясений (Average Planetary Magnitude, APM)

$$< M > = -\frac{\partial \ln Z}{\partial \eta}. \quad (3)$$

Как уже говорилось, ансамбль землетрясений формируется по данным того или иного глобального каталога (например, USGS catalog). Вероятность землетрясения с магнитудой M_j определяется как $P_j = v_j H_j / \sum_j v_j H_j$, где v_j — частота землетрясений с указанной магнитудой. Вполне понятно, что $\sum_j P_j = 1$. Выберем M_0 таким образом, чтобы при $M_j \geq M_0$ выполнялся закон Гутенберга — Рихтера [Касахара, 1985]. В этом случае

$$P_j = Z^{-1} \exp(-\eta M_j). \quad (4)$$

Формулы (1)–(3) приобретают содержательный смысл, если $\eta = b \ln 10$, где b — известный параметр распределения Гутенберга — Рихтера. Важно, что формулы для статистической суммы, АПМ и энтропии ансамбля землетрясений подобны тем, которые используются в теоретической физике [Ландау, Лифшиц, 2005].

При альтернативном подходе к описанию сейсмичности Земли мы используем классическую формулу

$$\log E = A + BM. \quad (5)$$

Здесь $A = 4.8$, $B = 1.5$, если E выражается в джоулях.

Формула (5) связывает магнитуду M по шкале Рихтера с энергией E данного конкретного землетрясения [Richter, 1958]. Пусть наш ансамбль сформирован землетрясениями, произошедшими за сутки [Guglielmi, Klain, 2019]. Находим среднюю энергию землетрясений и с помощью (5) определяем глобальную дневную магнитуду (Global Daily Magnitude, GDM):

$$M_g = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{\sum_j H_j \exp(\beta M_j)}{\sum_j H_j} \right], \quad (6)$$

где $\beta = B \ln 10$. Видно, что GDM формально и по существу отличается от APM.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ GDM И ЧИСЛАМИ ВОЛЬФА

Оба предложенных метода пригодны для изучения воздействия космических факторов на сейсмичность. Первый метод дает целый набор числовых характеристик сейсмичности. Однако при вычислении Z и других статистических параметров накладывается жесткое ограничение снизу на магнитуду землетрясений. Второй метод позволяет гибко варьировать нижнюю границу, но дает лишь одну числовую характеристику сейсмичности, а именно глобальную суточную магнитуду GDM. В данной работе мы ограничимся анализом возможной связи GDM со среднесуточными значениями чисел Вольфа W .

Рисунок 1 дает представление о вариациях M_g на 20-летнем интервале по данным каталога USGS при $M_0 = 1$, а на рис. 2 показано распределение событий по величине M_g . Мы видим, что представительная часть распределения удовлетворяет закону Гутенберга—Рихтера [Касахара, 1985]

$$\log v = a - bM, \quad (7)$$

где $a = 8.9$, $b = 1.1$.

В качестве показателя солнечной активности были выбраны суточные значения чисел Вольфа W . Всего накоплено 7300 пар значений M_g и W . Разброс точек, отражающий возможную статистическую связь между M_g и W , показан на рис. 3. Общая картина распределения точек свидетельствует о том, что зависимость M_g от W если и существует, то, во-первых, слабая, а во-вторых, довольно сложная. Однако даже слабая зависимость такого рода представляет несомненный интерес с позиций физики солнечно-земных связей, поэтому мы приведем один аргумент в пользу того, что зависимость M_g от W существует реально.

Из 7300 событий мы выделили два подмножества, образующие нижний и верхний секстилы S_n . Каждое подмножество содержит по 1217 пар значений M_g и W , причем нижний секстиль соответствует малым, а верхний — большим значениям M_g . Средние значения W для дней со слабой и сильной сейсмической активностью представлены на рис. 4. Видно, что средние числа Вольфа равны $W = 93.6 \pm 2$ и $W = 104.1 \pm 2$. Различие между средними W составляет 10.5. Нетрудно

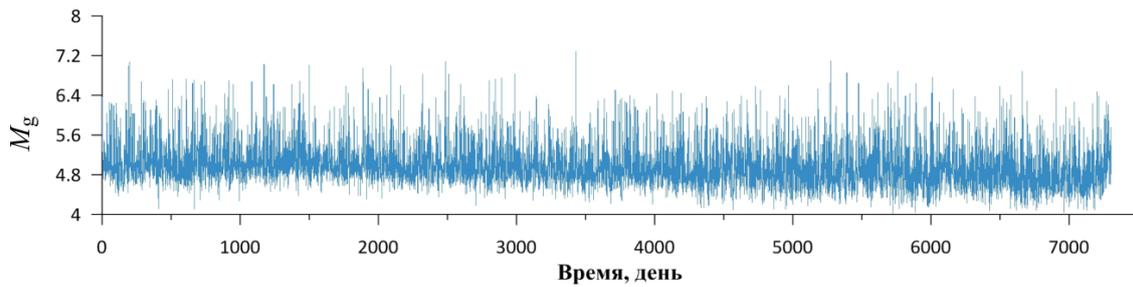


Рис. 1. Ряд значений GDM с 01.01.1980 по 12.31.1999

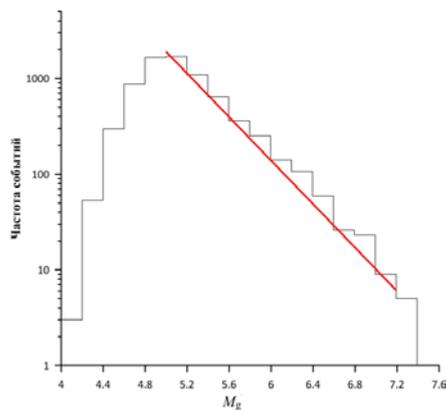


Рис. 2. Распределение частоты событий по величине GDM

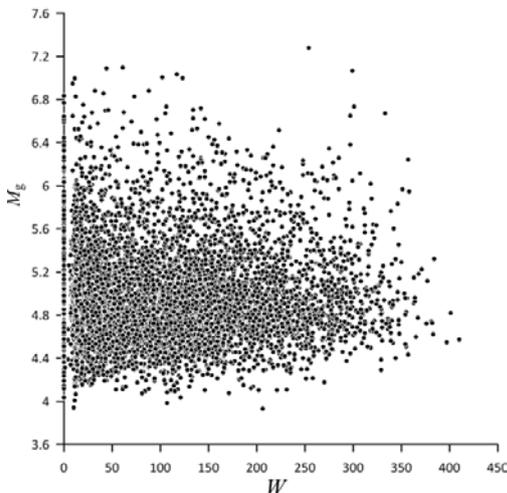


Рис. 3. Разброс точек на плоскости M_g-W

убедиться, что правило трех сигм выполняется с запасом, следовательно, зависимость M_g от W является достоверной на высоком уровне статистической значимости.

ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическая сумма Z ансамбля землетрясений представляет информацию о сейсмической активности. Однако только будущее покажет, даст ли такое представление ощутимые результаты при конкретном анализе глобальной сейсмичности. Экспериментальное изучение земных и космических факторов, влияющих на активность землетрясений, представляет собой довольно сложную задачу. Мы планируем использовать статистическую сумму Z для

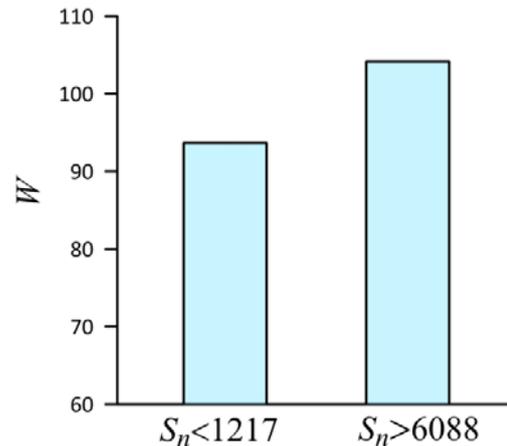


Рис. 4. Средние числа Вольфа для дней со слабой и сильной сейсмической активностью (левый и правый столбцы соответственно)

того, чтобы внести дополнительную ясность в эту проблему. В частности, мы предполагаем, что окажется полезным изучение флуктуаций планетарной магнитуды

$$\langle (\delta M)^2 \rangle = \frac{\partial^2 \ln Z}{\partial \eta^2}. \tag{8}$$

В определенном приближении Землю можно рассматривать как автономную динамическую систему. Опыт экспериментального и теоретического исследования автономных систем, накопленный в статистической радиофизике, указывает на то, что распределение флуктуаций содержит важную информацию о внутреннем устройстве и функционировании изучаемой системы [Рытов, 1976].

В данной работе мы использовали другой показатель сейсмичности, а именно глобальную суточную магнитуду M_g , для получения статистически обоснованного ответа на вопрос, воздействует ли переменная активность Солнца на сейсмичность Земли. Мы обнаружили, что величина M_g меняется со временем в весьма широких пределах (см. рис. 1). Несомненно, основной причиной этих изменений служат неравновесные процессы во внутренних оболочках планеты. Тем не менее нам удалось показать, что некоторая доля вариаций M_g определяется активностью Солнца. Как бы ни мала была эта доля, экспериментальное исследование вариаций такого рода представляет интерес с точки зрения физики землетрясений.

Предложенный подход к числовому описанию сейсмичности может оказаться полезным при изуче-

нии космических факторов, влияющих на активность землетрясений. Особый интерес представляет статистическое исследование связи числовых параметров планетарной сейсмичности с *Dst*-вариациями геомагнитного поля. В свете новых идей о магнитопластичности горных пород [Бучаченко, 2014, 2019] в этом направлении ожидаются интересные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выявления возможной связи землетрясений с солнечной активностью предложено два метода числового описания планетарной сейсмичности. Один из методов дает возможность вычислить статистическую сумму Z ансамбля землетрясений. Через Z выражается энтропия, средняя планетарная магнитуда и флуктуации магнитуды. При этом, однако, предполагается специальная выборка землетрясений: распределение выбранных событий по магнитуде должно подчиняться закону Гутенберга — Рихтера. Другой метод не содержит указанного ограничения, но позволяет вычислить лишь один числовой параметр, а именно глобальную суточную магнитуду M_g . Подсчитаны значения M_g за 20-летний период с 1980 по 1999 г. Сопоставление найденных значений M_g с числами Вольфа W позволило выявить воздействие Солнца на активность землетрясений на статистически значимом уровне.

Выражаем признательность А.Л. Бучаченко, А.Д. Завьялову, О.Д. Зотову и А.С. Потапову за интерес к данной работе. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 18-05-00096, программы № 12 президиума РАН, проекта КР19-27 Министерства образования и науки РФ, а также программы государственных заданий Института физики Земли РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. Отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации // ДАН. 2012. Т. 444, № 3. С. 304–308.
- Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // УФН. 2014. Т. 184. С. 101–108. DOI: [10.3367/UFNr.0184.201401e.0101](https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201401e.0101).
- Бучаченко А.Л. Микроволновое стимулирование дислокаций и магнитный контроль очага землетрясения // УФН. 2019. Т. 189. С. 47–54. DOI: [10.3367/UFNr.2018.03.038301](https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038301).
- Гульельми А.В. Пондеромоторные силы в коре и в магнитосфере Земли // Физика Земли. 1992. № 7. С. 35–39.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. 2012. № 2. С. 84–87.
- Гульельми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 1. С. 98–103. DOI: [10.12737/5694](https://doi.org/10.12737/5694).
- 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.
- Казахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. М.: Физматлит, 2005. 616 с.

Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1: Случайные процессы. М.: Наука, 1976. 484 с.

Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений // ДАН. 2010. Т. 435, № 4. С. 548–553.

Тарасов Н.Т. Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли // Инженерная физика. 2019. № 6. С. 23–33.

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

Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq variation // Nat. Hazards Earth Sys. Sci. 2003. V. 3, N 3/4. P. 171–177. DOI: [10.5194/nhess-3-171-2003](https://doi.org/10.5194/nhess-3-171-2003).

Guglielmi A.V., Klain B.I. Global magnitude of the earthquakes // arXiv:1909.00879 [physics.geo-ph] (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review // Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan. 2001. V. 121-A. P. 893–898. DOI: [10.1541/ieejfms.126.211](https://doi.org/10.1541/ieejfms.126.211).

Husamiddinov S.S. Seismoelectromagnetic and seismoionospheric effects preceding strong earthquakes in Uzbekistan // J. Earthquake Prediction Res. 2000. V. 8, N. 3. P. 367–375.

Masci F. On the recent reaffirmation of ULF magnetic earthquake precursors // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 2193–2198. DOI: [10.5194/nhess-11-2193-2011](https://doi.org/10.5194/nhess-11-2193-2011).

Richter C.F. Elementary Seismology. San Francisco: W.H. Freeman and Company; London: Bailey Bros. & Swinfen Ltd., 1958. 768 p.

Schekotov A.Yu., Fedorov E.N., Hobara Y., Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake // Telecommunications and Radio Engineering. 2012. V. 71, iss. 18. P. 1707–1718. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v71.i18.70](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v71.i18.70).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

REFERENCES

- Adushkin V.V., Ryabova S.A., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Response of the seismic background to geomagnetic variations. *Doklady Earth Sciences*. 2012, vol. 444, no. 1, pp. 642–646. DOI: [10.1134/S1028334X12050157](https://doi.org/10.1134/S1028334X12050157).
- Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *Physics-Uspokhi*. 2014, vol. 57, no. 1, pp. 92–98. DOI: [10.3367/UFNe.0184.201401e.0101](https://doi.org/10.3367/UFNe.0184.201401e.0101).
- Buchachenko A.L. Microwave stimulation of dislocations and the magnetic control of the earthquake core. *Physics-Uspokhi*. 2019, vol. 62, no. 1, pp. 46–53. DOI: [10.3367/UFNe.2018.03.038301](https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.03.038301).
- Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq variation. *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.* 2003, vol. 3, no. 3/4, pp. 171–177. DOI: [10.5194/nhess-3-171-2003](https://doi.org/10.5194/nhess-3-171-2003).
- Fainberg E.B., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Vasil'eva T.A. Generation of heat flows in the Earth's interior by global geomagnetic storms. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. 2004, vol. 40, no. 4, pp. 315–322 (In Russian).
- Guglielmi A.V. Ponderomotive forces in the crust and magnetosphere of the Earth. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. 1992, no. 7, pp. 35–39. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Zotov O.D. On magnetic disturbances before strong earthquakes. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. 2012, no. 2, pp. 84–87. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Lavrov I.P., Sobisevich A.L. Storm sudden commencements and earthquakes. *Solnechno-zemnaya*

fizika [Solar-Terrestrial Physics]. 2015, vol. 1, iss. 1, pp. 98–103. (In Russian).

Guglielmi A.V., Klain B.I. Global magnitude of the earthquakes. [arXiv:1909.00879](https://arxiv.org/abs/1909.00879) [physics.geo-ph]. (accessed September 30, 2019).

Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review. *Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan*. 2001, vol. 121-A, pp. 893–898. DOI: [10.1541/ieejfms.126.211](https://doi.org/10.1541/ieejfms.126.211).

Husamiddinov S.S. Seismoelectromagnetic and seismoionospheric effects preceding strong earthquakes in Uzbekistan. *J. Earthquake Prediction Res.* 2000, vol. 8, no. 3, pp. 367–375.

Kasahara K. *Mekhanika zemletryaseni* [Earthquake mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1985, 264 p. (In Russian). (English edition: Kasahara K. *Earthquake mechanics*. Cambridge University Press, 1981. 284 p.)

Landau L.D., Lifshitz E.M. *Statisticheskaya fizika* [Statistical physics]. Pt. 1. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 616 p. (In Russian). (English edition: Landau L.D., Lifshitz E.M. *Statistical physics*. Pt. 1. Butterworth-Heinemann, 1980. 544 p.)

Masci F. On the recent reaffirmation of ULF magnetic earthquakes precursors. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, vol. 11, pp. 2193–2198. DOI: [10.5194/nhess-11-2193-2011](https://doi.org/10.5194/nhess-11-2193-2011).

Richter C.F. *Elementary Seismology*. San Francisco, W.H. Freeman and Company; London, Bailey Bros. & Swinfen Ltd., 1958, 768 p.

Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch. 1: Sluchainye protsessy* [Introduction to Statistical Radiophysics. Pt. 1: Random processes]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 484 p. (In Russian).

Schekotov A.Yu., Fedorov E.N., Hobara Y., Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012, vol. 71, iss. 18, P. 1707–1718. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v71.i18.70](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v71.i18.70).

Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh., Sobisevich A.L. Observations of ULF geomagnetic disturbances reproduced processes of preparation and development of tsunamigenic earthquakes. *Doklady akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 2010, vol. 435, no. 2, pp. 1627–1632 (In Russian). DOI: [10.1134/S1028334X10120160](https://doi.org/10.1134/S1028334X10120160).

Tarasov N.T. The effect of solar activity on the seismicity of the Earth. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics]. 2019, no. 6, pp. 23–33 (In Russian).

Zakrzhevskaya N.A., Sobolev G.A. The effect of magnetic storms with a sudden start on seismicity in different regions. *Vulkanologiya i seismologiya* [Volcanology and Seismology]. 2004, no. 3, pp. 63–75 (In Russian).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (accessed September 30, 2019).

URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> (accessed September 30, 2019).

Как цитировать эту статью

Гульельми А.В., Клайн Б.И. О воздействии Солнца на сейсмичность земли. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 111–115. DOI: [10.12737/szf-61202010](https://doi.org/10.12737/szf-61202010).