

УДК: 519.257

Влияние солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии

А. А. Любушин^а, Е. А. Родионов^б

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,
Россия, 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

E-mail: ^а lyubushin@yandex.ru, ^б evgeny_980@list.ru

*Получено 05.05.2025, после доработки — 18.06.2025.
Принято к публикации 08.07.2025.*

Влияние солнечной активности на различные процессы на Земле давно является предметом пристального изучения, в результате которого появился термин «космическая погода». Наиболее ярким проявлением солнечной активности являются так называемые солнечные вспышки, которые представляют собой взрывное выделение энергии в атмосфере Солнца, в результате которых возникает поток фотонов и заряженных частиц, достигающий Землю с небольшим запаздыванием. Через двое-трое суток Землю достигает поток плазмы. Таким образом, солнечная вспышка представляет собой событие, растянутое во времени на несколько суток. Влияние солнечных вспышек на здоровье и техносферу человека является популярным предметом для обсуждения и научных исследований. В данной статье произведена количественная оценка триггерного эффекта влияния солнечных вспышек на выделение энергии в результате сейсмических событий. В статье получена оценка в виде процента от выделенной сейсмической энергии триггерного эффекта воздействия солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии по всему миру и в восьми областях Тихоокеанского огненного кольца. Исходные данные представляют собой временной ряд солнечных вспышек с 31 июля 1996 года по конец 2024 года. Исследовались временные точки наибольших локальных экстремумов интенсивности солнечных вспышек и выделенной сейсмической энергии в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки. Для каждой пары временных последовательностей в скользящих временных окнах с помощью параметрической модели интенсивности взаимодействующих точечных процессов оценивались меры опережения каждой временной последовательности относительно другой. Вычислялась разность между прямой мерой опережения временных точек локальных экстремумов интенсивности солнечных вспышек относительно моментов максимумов выделенной сейсмической энергии и обратной мерой опережения. Среднее значение разности мер опережения дает оценку доли интенсивности сейсмических событий, для которых солнечные вспышки являются триггером.

Ключевые слова: космическая погода, солнечная активность, сейсмический процесс, модель интенсивности связанных точечных процессов, функция правдоподобия

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института физики Земли РАН.

UDC: 519.257

The influence of solar flares on the release of seismic energy

A. A. Lyubushin^a, E. A. Rodionov^b

Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
10/1 Bolshaya Gruzinskaya st., Moscow, 123242, Russia

E-mail: ^a lyubushin@yandex.ru, ^b evgeny_980@list.ru

*Received 05.05.2025, after completion — 18.06.2025.
Accepted for publication 08.07.2025.*

The influence of solar activity on various processes on Earth has long been the subject of close study, which resulted in the appearance of the term “space weather”. The most striking manifestation of solar activity are the so-called “solar flares”, which are explosive releases of energy in the solar atmosphere, resulting in a flow of photons and charged particles reaching the Earth with a slight delay. After two or three days, a plasma flow reaches the Earth. Thus, a solar flare is an event stretched out in time for several days. The impact of solar flares on human health and the technosphere is a popular subject for discussion and scientific research. This article provides a quantitative assessment of the trigger effect of solar flares on the release of energy as a result of seismic events. The article provides an estimate in the form of a “percentage” of the released seismic energy of the trigger effect of solar flares on the release of seismic energy worldwide and in 8 areas of the Pacific Fire Ring. The initial data are a time series of solar flares from July 31, 1996 to the end of 2024. The time points of the greatest local extremes of solar flare intensity and released seismic energy were studied in successive time intervals of 1 day. For each pair of time sequences in sliding time windows, the “lead measures” of each time sequence relative to the other were estimated using a parametric model of the intensity of interacting point processes. The difference between the “direct” lead measure of the time points of local extremes of solar flare intensity relative to the moments of maximum released seismic energy and the “reverse” lead measure was calculated. The average value of the difference in lead measures provides an estimate of the share of the intensity of seismic events for which solar flares are a trigger.

Keywords: space weather, solar activity, seismic process, coupled point process intensity model, likelihood function

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2025, vol. 17, no. 4, pp. 567–581 (Russian).

The work was supported by Ministry of Education and Science of Russia, within the framework of state assignments of Institute of Physics of the Earth RAS.

1. Введение

Литература о солнечно-земных связях очень обширна и требует отдельной библиографической публикации. Тем не менее мы сделали краткий обзор тех работ, в которых непосредственно затронуты вопросы влияния солнечной активности на сейсмичность Земли. В обзоре [Singh et al., 2021] рассмотрены различные аспекты влияния солнечной активности на земной климат и антропогенные процессы. Ионосфера, как важная составляющая понятия космической погоды, изучалась в работах [Kokorowski et al., 2012; Kutiev et al., 2013; Elias et al., 2022]. Результаты разработки статистических методов прогнозирования сильных солнечных вспышек, в том числе с использованием аппарата машинного обучения, представлены в статьях [Laurenza et al., 2009; Anastasiadis et al., 2017; Aminalragia-Giamini et al., 2020; Alberti et al., 2021]. Важным вопросом исследования космической погоды является ее влияние на катастрофические события в жизни общества, такие как землетрясения. В частности, до сих пор не разработаны методы, позволяющие однозначно ответить на вопрос о том, обладают ли сильные солнечные вспышки и другие электромагнитные события в ионосфере триггерным воздействием на возникновение достаточно сильных землетрясений. Этому вопросу посвящено очень много исследований [Pulinets, Boyarchuk, 2004]. В работах [Huzaimy, Yumoto, 2011; Tavares, Azevedo, 2011] представлены результаты анализа корреляций между 11-летними циклами солнечной активности и временными интервалами увеличения интенсивности сейсмических событий за длительные промежутки времени. Сопоставление временных интервалов высокой сейсмической активности с фазами солнечных циклов с 1900 года проведено в работе [Anagnostopoulos et al., 2021]. Выделение эффектов запаздывания моментов времени сильных землетрясений относительно временных интервалов максимумов геомагнитных бурь рассматривалось в работах [Sobolev, 2021; Ouzounov, Khachikyan, 2024]. В работе [Saldanha, Hirata, 2022] аналогичный эффект запаздывания моментов времени сейсмических событий исследовался для чисел солнечных пятен. Гипотеза о возникновении временных аномалий атмосферных электрических полей, предшествующих возникновению сильных землетрясений, в том числе и глубоководных, в результате процессов в очаге готовящегося сейсмического события, исследована в работе [Pulinets, Khachikyan, 2021]. Аналогичный вопрос о возникновении атмосферных и ионосферных электромагнитных сигналов, фиксируемых космическими аппаратами и предшествующих сейсмическим событиям умеренной силы, рассматривался в статье [Marchetti et al., 2022]. В работах [Marchitelli et al., 2020a; Marchitelli et al., 2020b] отличие глобального сейсмического процесса от пуассоновского после исключения афтершоков объясняется пьезоэлектрическим эффектом в горных породах в результате воздействия потока протонов в процессе солнечной активности, которая обладает периодической временной структурой, помимо 11–12-летнего солнечного цикла. В работах [Novikov et al., 2020; Novikov, Sorokin, 2024; Sorokin et al., 2023] исследуются гипотеза о генерации теллурических токов в земной коре в результате воздействия возмущений ионосферных электромагнитных полей от солнечных вспышек и, как следствие, их триггерное воздействие на очаги будущих сейсмических событий. Статистический анализ влияния 50 крупнейших солнечных вспышек в интервале времени 1997–2024 гг. на глобальную сейсмическую активность был выполнен в [Sorokin, Novikov, 2024], в результате которого был обнаружен рост сейсмической активности в течение 10 дней после вспышки по сравнению с 10 днями до нее. В работе [Zeigarnik et al., 2022] сделан обзор работ в России за время 1995–2020 гг. по исследованиям влияния искусственных и естественных электромагнитных воздействий на сейсмичность.

2. Данные

Исходные данные по солнечным вспышкам свободно доступны с 31 июля 1996 года на сайте <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/>.html.

Эти данные представляют собой последовательность записей следующего вида: время начала вспышки, время максимума вспышки, время окончания вспышки, класс и интенсивность. Вспышки разбиты на 5 классов:

- класс А: самые слабые вспышки, с интенсивностью менее 10^{-7} Вт/м²;
- класс В: вспышки с интенсивностью от 10^{-7} до 10^{-6} Вт/м²;
- класс С: вспышки средней мощности, с интенсивностью от 10^{-6} до 10^{-5} Вт/м²;
- класс М: Мощные вспышки, с интенсивностью от 10^{-5} до 10^{-4} Вт/м²;
- класс Х: самые мощные вспышки, с интенсивностью более 10^{-4} Вт/м².

Таким образом, например, вспышке M3.56 соответствует интенсивность $3,56 \cdot 10^{-5}$ Вт/м².

Среднее значение длительности одной вспышки равно 19 минутам, медиана равна 13 минутам. Солнечные вспышки идут сериями по несколько событий в группе. По своей временной структуре они напоминают последовательность сейсмических событий, которые группируются после каждого достаточно мощного землетрясения и формируют ряд вторичных событий (афтершоков). В данном анализе нас интересует влияние суммарной энергии солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии. Для этого надо было выбрать некоторый малый интервал времени, который содержал бы все вспышки одной группы событий, и сформировать временной ряд выделения энергии вспышек с постоянным шагом по времени. Поскольку длины временных интервалов солнечных вспышек подчиняются 11–12-годовой периодичности солнечной активности, то длина малого интервала времени должна быть достаточной, чтобы в период низкой солнечной активности внутри этого интервала были какие-то вспышки. Такой минимальной длительностью оказались 5 суток. В результате вычислялись суммарные значения логарифмов интенсивностей солнечных вспышек в последовательных интервалах времени длиной 5 суток и определялись временные точки правых концов 5-дневных интервалов, соответствующих локальным максимумам суммы логарифмов интенсивностей. Временная точка t_* локального максимума временного ряда $x(t)$ с дискретным временным индексом t определяется из условия $x(t_* - 1) < x(t_*) < x(t_* + 1)$. Всего получилось 583 точки локальных максимумов. Эти временные точки представлены на рис. 1, а в виде последовательности красных точек. На этом графике видна сильная периодичность активности Солнца с периодом 11–12 лет.

Для всего мира вычислялись величины сброшенных сейсмических энергий в результате сейсмических событий в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки. Данные о землетрясениях по всему миру свободно доступны на сайте <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> в виде записей, содержащих момент времени события, географические координаты гипоцентра землетрясения, его глубину и магнитуду M . Величина выделившейся энергии E в результате землетрясения вычисляется по формуле Гуттенберга – Рихтера: $E = 10^{4,8+1,5M}$; значение энергии берется в джоулях. Для последовательности временных интервалов длиной 1 сутки вычислялась суммарная энергия, выделившаяся в результате всех сейсмических событий в течение суток. Заметим, что в течение суток может произойти несколько землетрясений, число которых иногда, для афтершоков после сильных землетрясений, доходит до нескольких десятков и даже сотен. Энергия всех этих событий суммируется. Если же в течение суток землетрясений не было, то выделившаяся энергия, очевидно, равна нулю. В последовательности ежесуточных значений сброшенных сейсмических энергий находились 583 наибольших локальных максимумов (такое же число, что и число локальных максимумов интенсивностей солнечных вспышек) и вычислялись их логарифмы. Эти временные точки представлены на рис. 1, б в виде последовательности черных точек в зависимости от положения правого конца временных интервалов длиной 1 сутки.

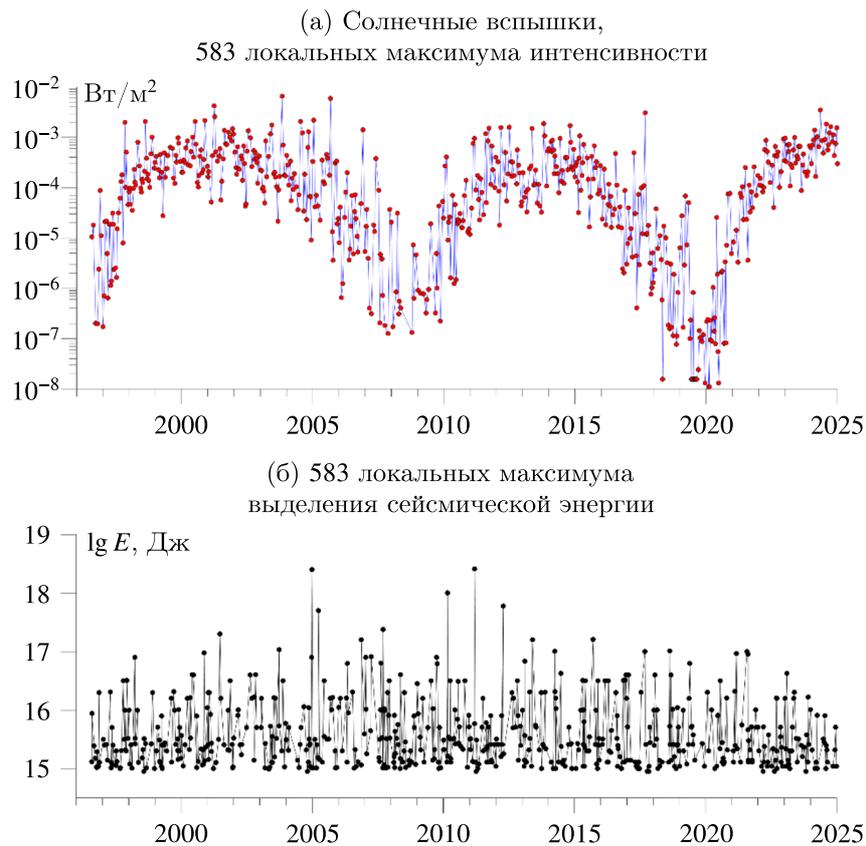


Рис. 1. (а) Красными точками представлена временная последовательность локальных максимумов суммарных значений логарифмов интенсивностей солнечных вспышек в последовательных интервалах времени длиной 5 суток. (б) Черными точками представлена временная последовательность 583 наибольших локальных максимумов логарифмов ежесуточных сброшенных сейсмических энергий для всего мира

3. Метод оценки меры взаимного опережения двух потоков событий

В дальнейшем нас будет интересовать вопрос о том, имеет ли место опережение моментов времени суммарных значений логарифмов интенсивностей солнечных вспышек в последовательных интервалах времени длиной 5 суток (рис. 1, а) относительно моментов времени наибольших локальных максимумов логарифмов ежесуточных сброшенных сейсмических энергий (рис. 1, б). Выяснение этого вопроса требует оценки также и обратного опережения и вычисления их разности. Если среднее значение этой разности положительно, то имеет место триггерный эффект воздействия потока протонов на сейсмичность. Кроме того, значение средней разности мер опережения даст меру триггерного воздействия.

Для выяснения этого вопроса мы применим метод матриц влияния, который использовался ранее в работах [Lyubushin, 2022; Lyubushin, Rodionov, 2024; Lyubushin et al., 2025; Lyubushin, Rodionov, 2025] для анализа связей между моментами времени сейсмических событий и временными точками локальных экстремумов различных статистик микросейсмического фона, флуктуаций магнитного поля, тремора земной поверхности, свойств метеорологических временных рядов и влияния потока протонов на сейсмический процесс. В работе [Lyubushin et al., 2024] этот метод использовался для выделения эффектов синхронного возбуждения колебаний двух крутильных маятников Кавендиша, разнесенных на расстояние 3000 км друг от друга (Москва и Новосибирск) перед сейсмическими событиями.

Пусть $t_j^{(\alpha)}$, $j = 1, \dots, N_\alpha$, $\alpha = 1, 2$, представляют собой моменты времен двух потоков событий. В нашем случае это:

- 1) последовательность моментов времени, соответствующих наибольшему локальным максимумам среднего логарифма интенсивностей солнечных вспышек в интервалах времени длиной 5 суток;
- 2) последовательность моментов времени наибольших локальных максимумов выделенной сейсмической энергии в интервалах времени длиной 1 сутки.

Представим их интенсивности в виде

$$\lambda^{(\alpha)}(t) = b_0^{(\alpha)} + b_1^{(\alpha)} g^{(1)}(t) + b_2^{(\alpha)} g^{(2)}(t), \quad (1)$$

где $b_0^{(\alpha)} \geq 0$, $b_\beta^{(\alpha)} \geq 0$ — параметры, $g^{(\beta)}(t)$ — функция влияния событий $t_j^{(\beta)}$ потока с номером β :

$$g^{(\beta)}(t) = \sum_{t_j^{(\beta)} < t} \exp\left(-\frac{t - t_j^{(\beta)}}{\tau}\right). \quad (2)$$

Согласно формуле (2) вес события с номером j становится ненулевым для времен $t > t_j^{(\beta)}$ и затухает с характерным временем τ . Параметр $b_\beta^{(\alpha)}$ определяет степень влияния потока событий β на поток α . Параметр $b_\alpha^{(\alpha)}$ определяет степень влияния потока α на самого себя (самовозбуждение), а параметр $b_0^{(\alpha)}$ отражает чисто случайную (пуассоновскую) компоненту интенсивности. Зафиксируем параметр τ и рассмотрим задачу определения параметров $b_0^{(\alpha)}$, $b_\beta^{(\alpha)}$.

Логарифмическая функция правдоподобия для нестационарного пуассоновского процесса равна на интервале времени $[0, T]$ [Cox, Lewis, 1966]

$$\ln(L_\alpha) = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \ln(\lambda^{(\alpha)}(t_j^{(\alpha)})) - \int_0^T \lambda^{(\alpha)}(s) ds, \quad \alpha = 1, 2. \quad (3)$$

Необходимо найти максимум функций (3) по отношению к параметрам $b_0^{(\alpha)}$, $b_\beta^{(\alpha)}$. Принимая во внимание формулу (1), можно записать производную от логарифмической функции правдоподобия по параметрам

$$\frac{\partial \ln(L_\alpha)}{\partial b_0^{(\alpha)}} = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \frac{1}{\lambda^{(\alpha)}(t_j^{(\alpha)})} - \int_0^T ds, \quad \frac{\partial \ln(L_\alpha)}{\partial b_\beta^{(\alpha)}} = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \frac{g^{(\beta)}(t_j^{(\alpha)})}{\lambda^{(\alpha)}(t_j^{(\alpha)})} - \int_0^T g^{(\beta)}(s) ds, \quad (4)$$

откуда и из формулы (1) следует

$$b_0^{(\alpha)} \frac{\partial \ln(L_\alpha)}{\partial b_0^{(\alpha)}} + \sum_{\beta=1}^2 b_\beta^{(\alpha)} \frac{\partial \ln(L_\alpha)}{\partial b_\beta^{(\alpha)}} = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \left\{ \frac{b_0^{(\alpha)} + b_1^{(\alpha)} g^{(1)}(t_j^{(\alpha)}) + b_2^{(\alpha)} g^{(2)}(t_j^{(\alpha)})}{\lambda^{(\alpha)}(t_j^{(\alpha)})} \right\} - \int_0^T (b_0^{(\alpha)} + b_1^{(\alpha)} g^{(1)}(s) + b_2^{(\alpha)} g^{(2)}(s)) ds = N_\alpha - \int_0^T \lambda^{(\alpha)}(s) ds. \quad (5)$$

Поскольку параметры $b_0^{(\alpha)}$, $b_\beta^{(\alpha)}$ должны быть неотрицательными, то каждый член в самой левой части этой формулы равен нулю в точке максимума функции (3): либо в силу необходимых

условий экстремума (если параметры положительны), либо, если максимум достигается на границе, сами параметры равны нулю. Следовательно, в точке максимума функции правдоподобия выполняется равенство

$$\int_0^T \lambda^{(\alpha)}(s) ds = N_\alpha. \quad (6)$$

Подставим выражение $g^{(\beta)}(t)$ из (2) в (6) и разделим на T . Тогда получим другой вид формулы (6):

$$b_0^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^m b_\beta^{(\alpha)} \cdot \bar{g}^{(\beta)} = \lambda_0^{(\alpha)} \equiv \frac{N_\alpha}{T}, \quad (7)$$

где

$$\bar{g}^{(\beta)} = \int_0^T \frac{g^{(\beta)}(s) ds}{T} \quad (8)$$

— среднее значение функции влияния. Подставляя $b_0^{(\alpha)}$ из (7) в (3), получим следующую задачу на максимум:

$$\Phi^{(\alpha)}(b_1^{(\alpha)}, b_2^{(\alpha)}) = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \ln(\lambda_0^{(\alpha)} + b_1^{(\alpha)} \Delta g^{(1)}(t_j^{(\alpha)}) + b_2^{(\alpha)} \Delta g^{(2)}(t_j^{(\alpha)})) \rightarrow \max_{b_1^{(\alpha)}, b_2^{(\alpha)}}, \quad (9)$$

где $\Delta g^{(\beta)}(t) = g^{(\beta)}(t) - \bar{g}^{(\beta)}$ при ограничениях

$$b_1^{(\alpha)} \geq 0, \quad b_2^{(\alpha)} \geq 0, \quad b_1^{(\alpha)} \bar{g}^{(1)} + b_2^{(\alpha)} \bar{g}^{(2)} \leq \lambda_0^{(\alpha)}. \quad (10)$$

Обозначим $Q^{(\alpha)}(t_j^{(\alpha)}) = \lambda_0^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^2 b_\beta^{(\alpha)} \cdot \Delta g^{(\beta)}(t_j^{(\alpha)})$. Тогда матрица вторых производных (гессиан) функции (9) равна

$$\frac{\partial^2 \Phi^{(\alpha)}}{\partial b_p^{(\alpha)} \partial b_q^{(\alpha)}} = - \sum_{j=1}^{N_\alpha} \frac{\Delta g^{(p)}(t_j^{(\alpha)}) \cdot \Delta g^{(q)}(t_j^{(\alpha)})}{(Q^{(\alpha)}(t_j^{(\alpha)}))^2}, \quad p, q = 1, 2. \quad (11)$$

Нетрудно убедиться в том, что гессиан (11) является отрицательно определенным и, следовательно, функция (9) выпукла вверх и имеет единственный максимум внутри ограниченного выпуклого множества, задаваемого неравенствами (10). Решив численно задачу (9)–(10) методом проекции градиента для заданного τ , можно ввести элементы матрицы влияния $\kappa_\beta^{(\alpha)}$, $\alpha = 1, 2$, $\beta = 0, 1, 2$, согласно формулам

$$\kappa_0^{(\alpha)} = \frac{b_0^{(\alpha)}}{\lambda_0^{(\alpha)}} \geq 0, \quad \kappa_\beta^{(\alpha)} = \frac{b_\beta^{(\alpha)} \cdot \bar{g}^{(\beta)}}{\lambda_0^{(\alpha)}} \geq 0. \quad (12)$$

Величина $\kappa_0^{(\alpha)}$ является частью средней интенсивности $\lambda_0^{(\alpha)}$ процесса с номером α , являющейся чисто стохастической, часть $\kappa_\alpha^{(\alpha)}$ вызвана влиянием самовозбуждения $\alpha \rightarrow \alpha$ и $\kappa_\beta^{(\alpha)}$, $\beta \neq \alpha$, обусловлена внешним влиянием $\beta \rightarrow \alpha$. Из формулы (12) вытекает условие нормировки:

$$\kappa_0^{(\alpha)} + \kappa_1^{(\alpha)} + \kappa_2^{(\alpha)} = 1, \quad \alpha = 1, 2. \quad (13)$$

В результате можно определить матрицу влияния:

$$\begin{pmatrix} \kappa_0^{(1)} & \kappa_1^{(1)} & \kappa_2^{(1)} \\ \kappa_0^{(2)} & \kappa_1^{(2)} & \kappa_2^{(2)} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Первый столбец матрицы (14) составлен из долей Пуассона средних интенсивностей. Диагональные элементы правой подматрицы размером 2×2 состоят из самовозбуждающихся элементов средней интенсивности, тогда как недиагональные элементы соответствуют взаимному возбуждению. Суммы составляющих строк матрицы влияния (14) равны 1. Матрицы влияния оцениваются в некотором скользящем временном окне длиной L со смещением ΔL и с заданным значением параметра затухания τ .

При анализе вариаций компонент матриц влияния в скользящих временных окнах, соответствующих взаимному влиянию анализируемых временных последовательностей, основное внимание уделяется их локальным максимумам с последующим их усреднением. Ниже описан метод обработки этих локальных максимумов и их усреднения для набора длин временных окон, изменяющихся в заданных пределах.

1. Выбираются минимальные (L_{\min}) и максимальные (L_{\max}) длины временных окон, и N_L — число длин временных окон в этом промежутке. Таким образом, длины временных окон принимали значения $L_k = L_{\min} + (k-1)\Delta L$, $k = 1, \dots, N_L$, $\Delta L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{N_L - 1}$. В наших расчетах мы брали L_{\min} равным 1 году, а $L_{\max} = 5$ лет, $N_L = 100$.

2. Каждое временное окно длиной L_k смещалось слева направо по временной оси с некоторым смещением Δt . Обозначим через $t_j(L_k)$, $j = 1, \dots, M(L_k)$, последовательность моментов времени положений правых окон длиной L_k . Число $M(L_k)$ временных окон длиной L_k определяется их временным смещением Δt . Мы использовали смещение временных окон Δt , равное 0,01 года.

3. Для каждого положения временного окна длиной L_k оцениваются элементы матрицы влияния (14) для заданного времени релаксации τ модели (11)–(12), соответствующие взаимному влиянию двух анализируемых процессов. Мы брали значение τ , равное 0,5 года. Для определенности будем рассматривать какое-то одно влияние, например первого процесса на второй. В результате таких оценок получим их значения в виде $(t_j(L_k), c_j(L_k))$, где $c_j(L_k)$ — соответствующий элемент матрицы влияния для положения с номером j временного окна длиной L_k .

4. В последовательности $(t_j(L_k), c_j(L_k))$ выберем элементы $(t_j^*(L_k), c_j^*(L_k))$, соответствующие локальным максимумам значений $c_j(L_k)$, то есть из условия $c_{j-1}(L_k) < c_j^*(L_k) < c_{j+1}(L_k)$.

5. Выберем малый промежуток времени длиной ε и для последовательности таких временных фрагментов вычислим среднее значение локальных максимумов $c_j^*(L_k)$, для которых их временные метки $t_j^*(L_k)$ принадлежат этим фрагментам. Усреднение производится по всем длинам временных окон L_k , $k = 1, \dots, N_L$. В наших расчетах мы брали длину ε равной 0,1 года.

Полный набор свободных параметров метода матриц влияния составляет: τ , L_{\min} , L_{\max} , N_L , Δt , ε . Наиболее критическими для результатов вычислений является выбор параметров τ , L_{\min} , L_{\max} . Выбор этих параметров осуществлялся их перебором по сетке значений в заданных пределах. Пробные значения времени затухания τ изменялись в пределах от 0,05 года до 2 лет с шагом 0,05 года. Значения параметра L_{\min} изменялось от 0,5 года до 2 лет, а значения параметра L_{\max} — в пределах от 3 лет до 10 лет с шагом 0,25 года. Таким образом, в 3-мерном множестве параметров τ , L_{\min} , L_{\max} имеется дискретный набор точек, для каждого из которых можно вычислить среднее значение $G(Sun \rightarrow EQ)$ меры опережения между моментами времени локальных максимумов суммарной интенсивности солнечных вспышек в последовательных временных интервалах длиной 5 суток относительно локальных максимумов ежесуточных выделений сейсмической энергии и среднее значение $G(EQ \rightarrow Sun)$ обратной меры опережения. Нас

интересует разность средних мер: $\Delta G = G(Sun \rightarrow EQ) - G(EQ \rightarrow Sun)$. Выбор параметров τ , L_{min} , L_{max} осуществлялся из условия максимального значения ΔG .

На рис. 2 представлены результаты вычислений средних значений локальных максимумов элементов матриц влияния в прямую и в обратную стороны и их разницы, которая дает оценку триггерного влияния солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии для всего мира. Получилось, что в среднем для интервала наблюдений 1996–2024 гг. 16 % интенсивности выделения сейсмической энергии обусловлено триггерным воздействием солнечных вспышек. Важно отметить, что это триггерное воздействие не является стационарным: доля временных интервалов, для которых разница между элементами матриц влияния на рис. 2, в является положительной, равна 0,79.

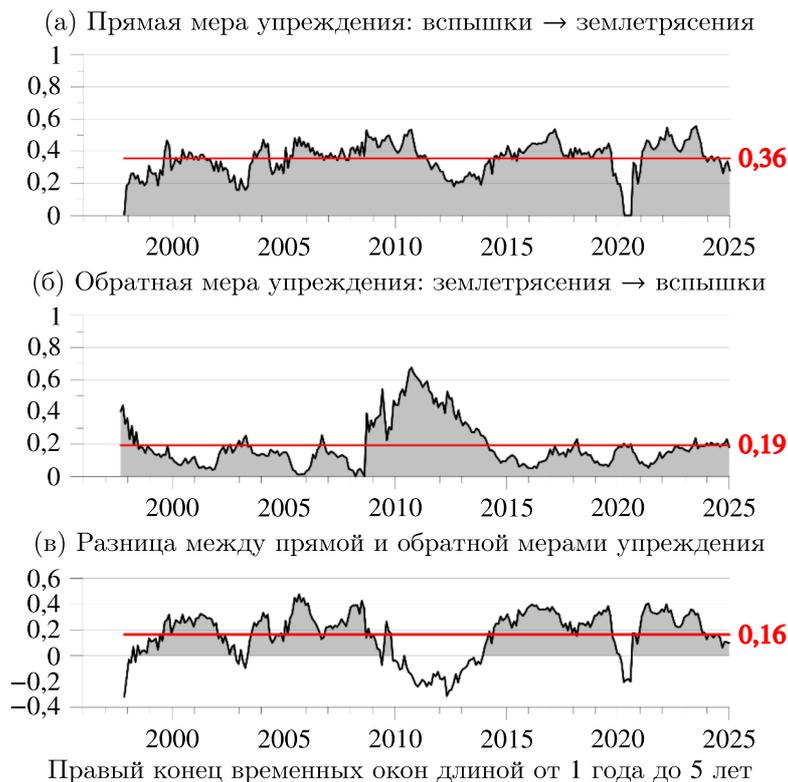


Рис. 2. Графики (а) и (б) представляют средние значения максимальных локальных максимумов компонент матриц влияния на последовательных временных отрезках длиной 0,1 года для прямого и обратного влияния для всего мира. График (в) дает разницу между прямым и обратным влиянием. Горизонтальные красные линии соответствуют средним значениям компонент матриц влияния

4. Области Тихоокеанского огненного кольца

Значительная часть сейсмичности Земли (около 80 %) сосредоточена в так называемом Тихоокеанском огненном кольце, которое фактически совпадает с побережьем Тихого океана (за исключением Антарктиды). Эта концентрация сейсмичности обусловлена тем, что там находятся зоны субдукции, в которых происходят погружение в мантию океанических плит и их столкновение с материковыми плитами. Представляет интерес оценка триггерного эффекта воздействия солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии в различных частях Тихоокеанского огненного кольца. На рис. 3 представлено выделение восьми регионов (пронумерованных от 1 до 8) кольца. Регионы выделены как прямоугольные области на координатной плоскости (широта, долгота). Параметры выделения представлены в таблице 1.

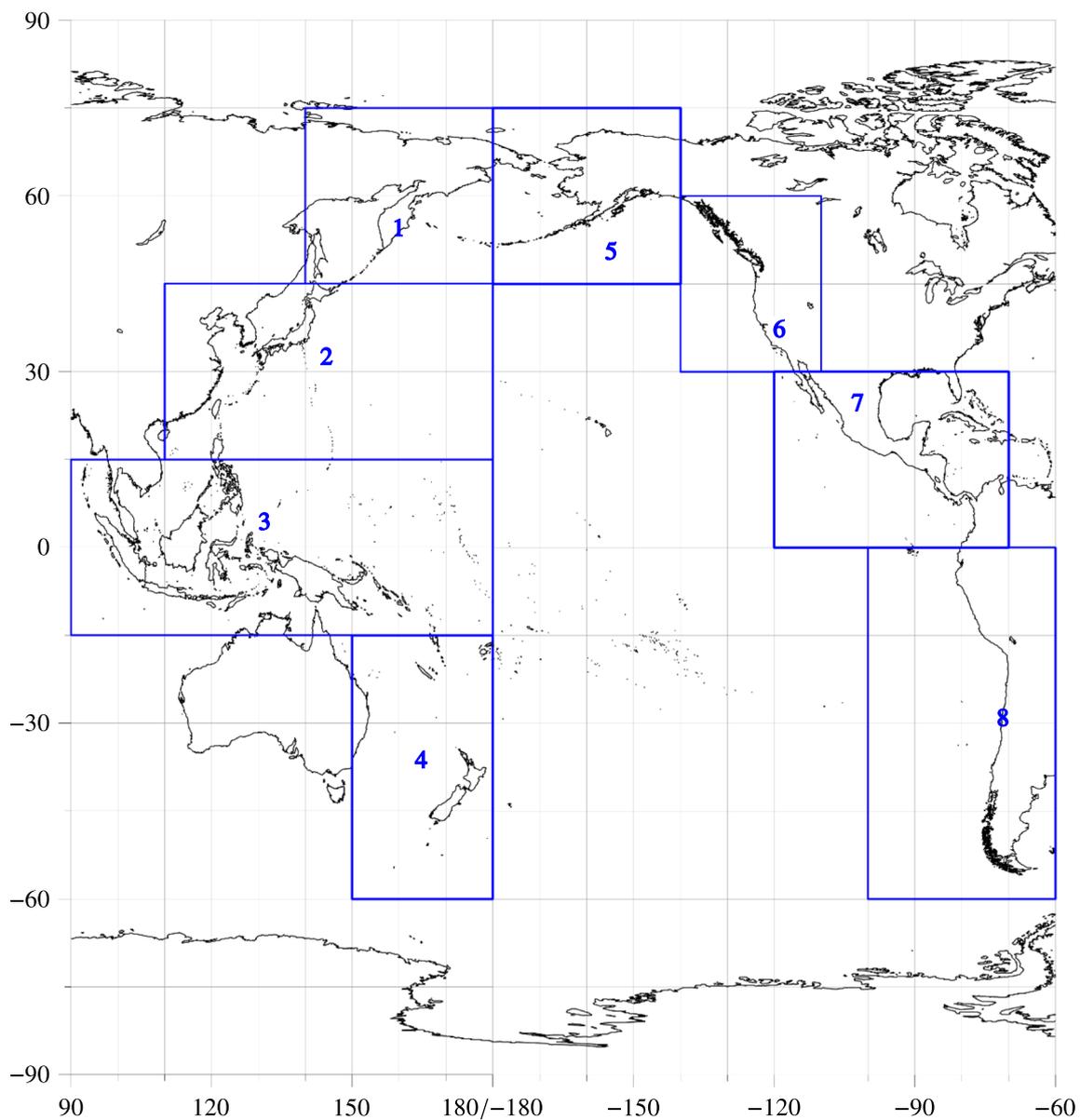


Рис. 3. Выделенные области Тихоокеанского огненного кольца

Таблица 1. Минимальные и максимальные значения широты и долгот восьми областей, выделенных на рис. 3

Номер области	Широта мин., град.	Широта макс., град.	Долгота мин., град.	Долгота макс., град.
1	45	75	140	180
2	15	45	110	160
3	-15	15	90	180
4	-60	-15	150	180
5	45	75	-180	-140
6	30	60	-140	-110
7	0	30	-120	-70
8	-60	0	-100	-60

Для восьми регионов, представленных на рис. 3, вычислялись логарифмы сброшенных сейсмических энергий в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки. В этих значениях логарифмов энергии также бралось число 583 наибольших локальных максимумов, равное числу локальных максимумов интенсивности солнечных вспышек. Временные последовательности этих наибольших локальных максимумов представлены черными точками на графиках на рис. 4.

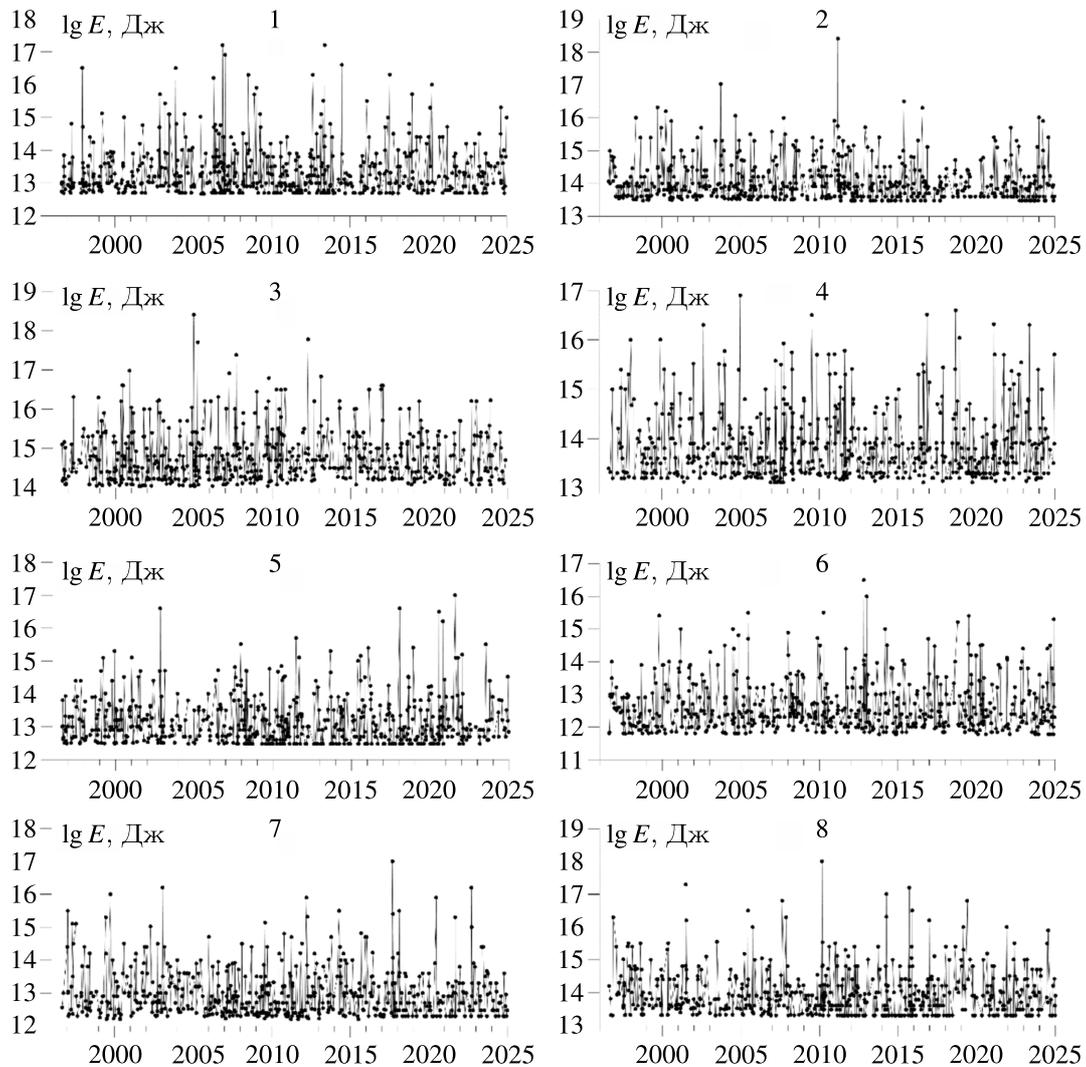


Рис. 4. Логарифмы 583 наибольших локальных максимумов выделенной сейсмической энергии в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки в восьми регионах Тихоокеанского огненного кольца

Интересно отметить, что среднее значение интенсивности выделения сейсмической энергии, обусловленного триггерным влиянием солнечных вспышек, имеет тенденцию расти при уменьшении средней широты прямоугольных областей, представленных на рис. 3. В частности, наибольшие средние значения имеют место для регионов с номером 4 (0,35 — окрестность Новой Зеландии) и с номером 8 (0,30 — Южная Америка), расположенных в Южном полушарии.

Кроме того, при просмотре графиков на рис. 5 нетрудно заметить общую особенность, заключающуюся в падении отклика на сейсмические вспышки примерно в одно и то же время. Для более четкого определения временного интервала уменьшения отклика выделения сейсмической энергии в областях Тихоокеанского огненного кольца на солнечные вспышки усредним зависи-

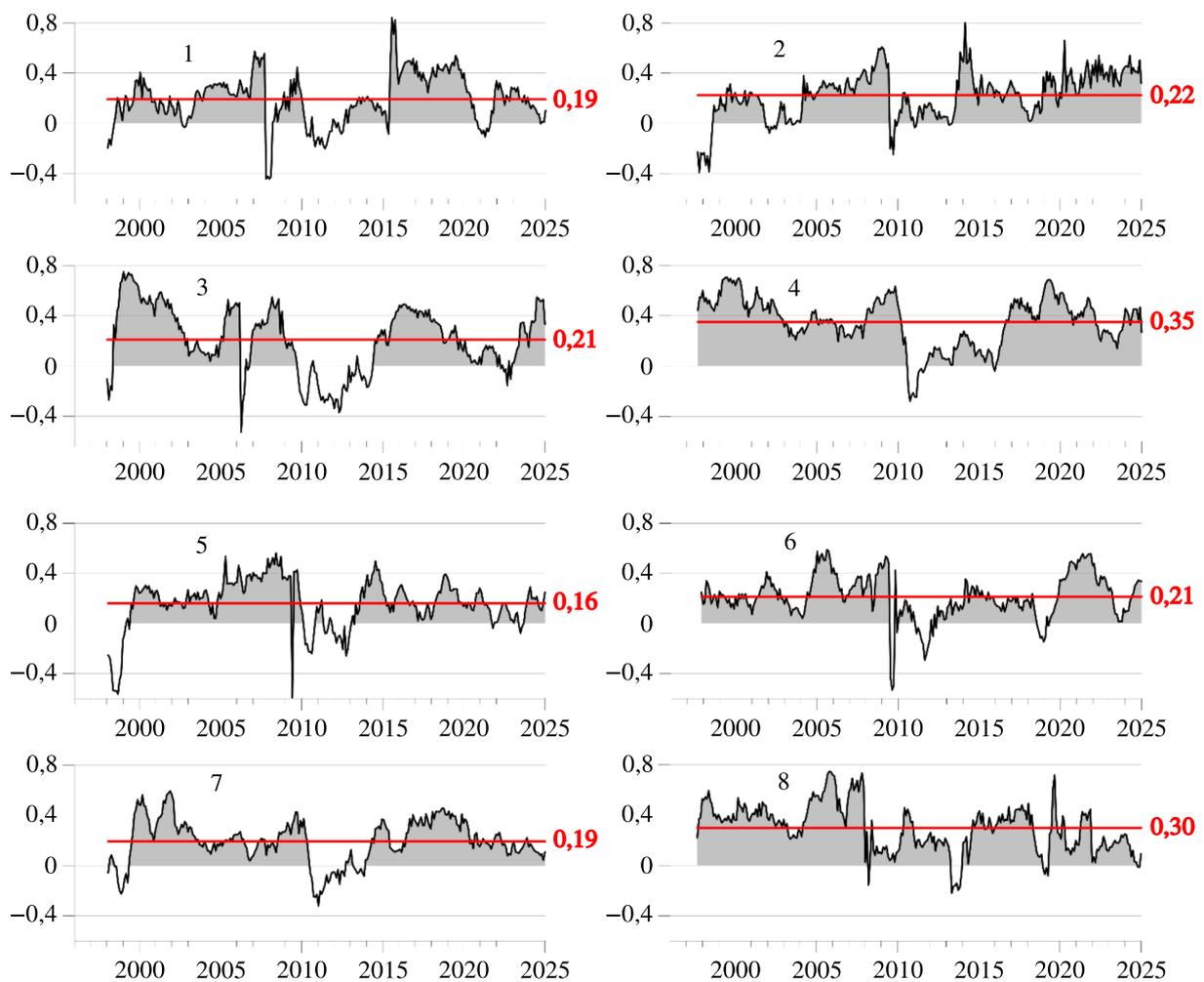


Рис. 5. На графиках представлена разница между средними значениями прямого и обратного влияния для восьми регионов из таблицы 1, из которой видно, что эта разница в основном положительная. Горизонтальные красные линии соответствуют средним значениям компонент матриц влияния. Средние значения указаны справа от каждого графика красными цифрами

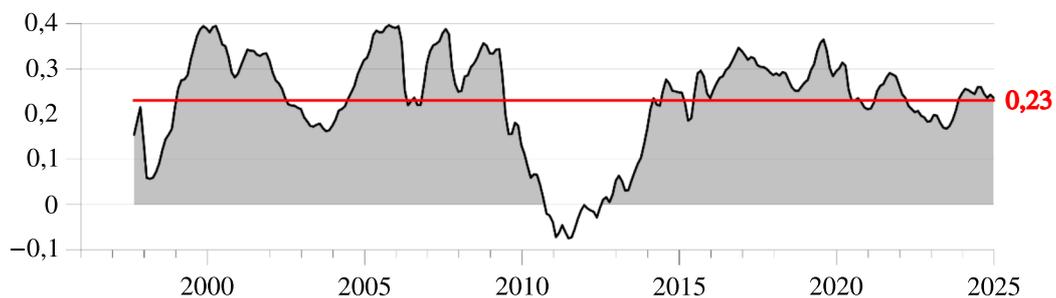


Рис. 6. Результат усреднения зависимостей от всех восьми регионов Тихоокеанского огненного кольца

мости, представленные на рис. 5. Результат такого усреднения представлен на рис. 6. Среднее значение части от интенсивности выделения сейсмической энергии в результате триггерного воздействия солнечных вспышек для всего Тихоокеанского огненного кольца (0,23) оказалось выше, чем для всего мира (0,16 — см. рис. 2, в), причем имеется интервал времени 2009–2014 гг., когда триггерное воздействие солнечных вспышек минимально.

5. Выводы

Предложен метод анализа триггерного воздействия солнечных вспышек на сейсмичность Земли, основанный на применении параметрической модели интенсивности взаимодействующих точечных процессов. В результате проведенного анализа получена оценка части интенсивности выделения сейсмической энергии, обусловленной триггерным влиянием солнечных вспышек для всего мира и для восьми областей Тихоокеанского огненного кольца. Триггерное влияние солнечных вспышек является нестационарным; в частности, для интервала времени 2009–2014 гг. воздействие солнечной активности на сейсмичность оказалось минимальным.

Отметим, что используемый метод матриц влияния технически может быть применен к анализу триггерного воздействия солнечных вспышек не только на сейсмичность Земли, но и на, например, всплески вызовов службы скорой помощи при различных диагнозах и на прочие экстремальные проявления в обществе и техносфере.

Список литературы (References)

- Alberti T., Consolini G., Marcucci M.F.* Open issues in statistical forecasting of solar proton events: A machine learning perspective // *Space Weather*. — 2021. — Vol. 19. — e2021SW002794. — <https://doi.org/10.1029/2021SW002794>
- Aminalragia-Giamini S., Jiggins P., Anastasiadis A., Sandberg I., Aran A., Vainio R., Papadimitriou C., Papaioannou A., Tsigkanos A., Paouris E., Vasalos G., Paassilta M., Dierckxsens M.* Prediction of solar proton event fluence spectra from their peak flux spectra // *J. Space Weather Space Clim.* — 2020. — Vol. 10. — P. 1–16. — <https://doi.org/10.1051/swsc/2019043>
- Anagnostopoulos G., Spyroglou I., Rigas A., Preka-Papadema P., Mavromichalaki H., Kiosses I.* The sun as a significant agent provoking earthquakes // *Eur. Phys. J. Special Topics*. — 2021. — Vol. 230. — P. 287–333 — <https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000266-2>
- Anastasiadis A., Papaioannou A., Sandberg I., Georgoulis M., Tziotziou K., Kouloumvakos A., Jiggins P.* Predicting flares and solar energetic particle events: the FORSPEF tool // *Sol. Phys.* — 2017. — Vol. 292. — Art. 134. — <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1163-7>
- Cox D. R., Lewis P. A. W.* The statistical analysis of series of events. — London, 1966.
- Elias A. G., de Haro Barbas B. F., Zossi B. S., Medina F. D., Fagre M., Venchiarutti J. V.* Review of long-term trends in the equatorial ionosphere due the geomagnetic field secular variations and its relevance to space weather // *Atmosphere*. — 2022. — Vol. 13. — P. 40. — <https://doi.org/10.3390/atmos13010040>
- Huzaimy J., Yumoto K.* Possible correlation between solar activity and global seismicity // *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*, Penang, Malaysia, 12–13 July 2011. — P. 138–141. — <https://doi.org/10.1109/IconSpace.2011.6015869>
- Kokorowski M., Seppälä A., Sample J. G., Holzworth R. H., McCarthy M. P., Bering E. A., Turunen E.* Atmosphere-ionosphere conductivity enhancements during a hard solar energetic particle event // *J. Geophys. Res.* — 2012. — Vol. 117, No. A5. — <https://doi.org/10.1029/2011JA017363>
- Kutiev I., Tsagouri I., Perrone L., Pancheva D., Mukhtarov P., Mikhailov A., Lastovicka J., Jakowski N., Buresova D., Blanch E., Andonov B., Altadil D. I., Magdaleno S., Paris M., Torta J. M.* Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere // *J. Space Weather Space Clim.* — 2013. — Vol. 3. — Art. A06. — <https://doi.org/10.1051/swsc/2013028>
- Laurenza M., Cliver E. W., Hewitt J., Storini M., Ling A. G., Balch C. C., Kaiser M. L.* A technique for short-term warning of solar energetic particle events based on flare location, flare size, and evidence of particle escape // *Space Weather*. — 2009. — Vol. 7, No. 4. — <https://doi.org/doi:10.1029/2007SW000379>

- Lyubushin A.* Investigation of the global seismic noise properties in connection to strong earthquakes // *Front. Earth Sci.* — 2022. — Vol. 10. — <https://doi.org/10.3389/feart.2022.905663>
- Lyubushin A., Kopylova G., Rodionov E., Serafimova Y.* An analysis of meteorological anomalies in Kamchatka in connection with the seismic process // *Atmosphere.* — 2025. — Vol. 16. — P. 78. — <https://doi.org/10.3390/atmos16010078>
- Lyubushin A., Rodionov E.* Prognostic properties of instantaneous amplitudes maxima of earth surface tremor // *Entropy.* — 2024. — Vol. 26. — P. 710. — <https://doi.org/10.3390/e26080710>
- Lyubushin A., Rodionov E.* Quantitative assessment of the trigger effect of proton flux on seismicity // *Entropy.* — 2025. — Vol. 27. — P. 505. — <https://doi.org/10.3390/e27050505>
- Lyubushin A., Rodionov E.* Wavelet-based correlations of the global magnetic field in connection to strongest earthquakes // *Advances in Space Research.* — 2024. — Vol. 74, No. 8. — P. 3496–3510. — <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.046>
- Lyubushin A.A., Matyunin V.P., Kalinnikov I.I., Isachenko V.I., Manukin A.B.* Bursts of synchronization of torsion pendulum readings and their connection with seismic events // *Seismic Instruments.* — 2024. — Vol. 60. — P. 19–28. — <https://doi.org/10.3103/S0747923925700082>
- Marchetti D., De Santis A., Campuzano S.A., Zhu K., Soldani M., D’Arcangelo S., Orlando M., Wang T., Cianchini G., Di Mauro D., Ippolito A., Nardi A., Sabbagh D., Chen W., He X., Shen X., Wen J., Zhang D., Zhang H., Yiqun Zh., Zeren Zh.* Worldwide statistical correlation of eight years of swarm satellite data with M5.5+ earthquakes: new hints about the preseismic phenomena from space // *Remote Sens.* — 2022. — Vol. 14. — P. 2649. — <https://doi.org/10.3390/rs14112649>
- Marchitelli V., Harabaglia P., Troise C., De Natale G.* On the correlation between solar activity and large earthquakes worldwide // *Scientific Reports.* — 2020a. — Vol. 10. — Art. 11495. — <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67860-3>
- Marchitelli V., Troise C., Harabaglia P., Valenzano B., De Natale G.* On the long range clustering of global seismicity and its correlation with solar activity: a new perspective for earthquake forecasting // *Front. Earth Sci.* — 2020b. — Vol. 8. — <https://doi.org/10.3389/feart.2020.595209>
- Novikov V., Ruzhin Y., Sorokin V., Yaschenko A.* Space weather and earthquakes: Possible triggering of seismic activity by strong solar flares // *Ann. Geophys.* — 2020. — Vol. 63, No. 5. — <http://dx.doi.org/10.4401/ag-7975>
- Novikov V.A., Sorokin V.M.* Electromagnetic trigger effects in the ionosphere-atmosphere-lithosphere system and their possible use for short-term earthquake forecasting // *Izv., Phys. Solid Earth.* — 2024. — Vol. 60. — P. 879–890. — <https://doi.org/10.1134/S1069351324700800>
- Ouzounov D., Khachikyan G.* Studying the impact of the geospace environment on solar lithosphere coupling and earthquake activity // *Remote Sens.* — 2024. — Vol. 16. — P. 24. — <https://doi.org/10.3390/rs16010024>
- Pulinets S., Khachikyan G.* The Global electric circuit and global seismicity // *Geosciences.* — 2021. — Vol. 11. — P. 491. — <https://doi.org/10.3390/geosciences11120491>
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.* *Ionospheric precursors of earthquakes.* — Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2004.
- Saldanha M.H.J., Hirata Y.* Solar activity facilitates daily forecasts of large earthquakes // *Chaos Interdiscip. J. Nonlinear Sci.* — 2022. — Vol. 32. — P. 061107. — <https://doi.org/10.1063/5.0096150>
- Singh A.K., Bhargawa A., Siingh D., Singh R.P.* Physics of space weather phenomena: a review // *Geosciences.* — 2021. — Vol. 11. — P. 286. — <https://doi.org/10.3390/geosciences11070286>
- Sobolev G.A.* The effect of strong magnetic storms on the occurrence of large earthquakes // *Izv., Phys. Solid Earth.* — 2021. — Vol. 57. — P. 20–36. — <https://doi.org/10.1134/S1069351321010080>
- Sorokin V., Novikov V.* Possible interrelations of space weather and seismic activity: an implication for earthquake forecast // *Geosciences.* — 2024. — Vol. 14. — P. 116. — <https://doi.org/10.3390/geosciences14050116>

-
- Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V.* Telluric currents generated by solar flare radiation: physical model and numerical estimations // *Atmosphere*. — 2023. — Vol. 14. — P. 458. — <https://doi.org/10.3390/atmos14030458>
- Tavares M., Azevedo A.* Influences of solar cycles on earthquakes // *Nat. Sci.* — 2011. — Vol. 3. — P. 436. — <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2011.36060>
- Zeigarnik V.A., Bogomolov L.M., Novikov V.A.* Electromagnetic earthquake triggering: field observations, laboratory experiments, and physical mechanisms — a review // *Izv., Phys. Solid Earth*. — 2022. — Vol. 58. — P. 30–58. — <https://doi.org/10.1134/S1069351322010104>