

Влияние солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии в Тихоокеанском огненном кольце

А.А. Любушин, Е.А. Родионов

Институт физики Земли РАН, Москва

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

22-23 октября 2025 года
ИТПЗ РАН, Москва

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 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.

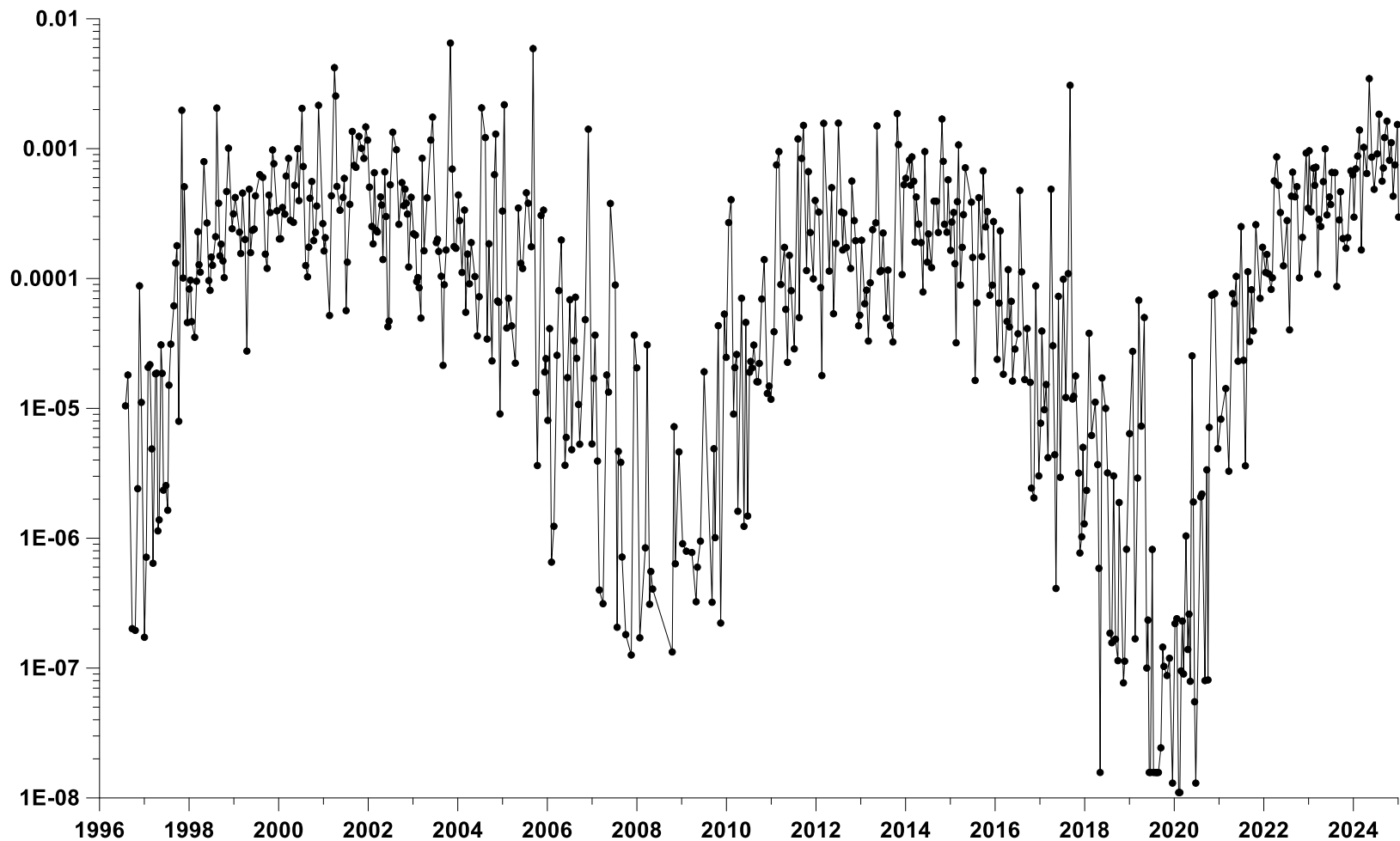
Вычислялись суммарные значения логарифмов интенсивностей солнечных вспышек в последовательных интервалах времени длиной 5 суток и определялись временные точки правых концов 5-дневных интервалов, соответствующих локальным максимумам суммы логарифмов интенсивностей. Всего получилось 583 точки локальных максимумов. Эти временные точки представлены ниже. На этом графике видна сильная периодичность активности Солнца с периодом 11-12 лет.

Среднее значение длительности одной вспышки равно 19 минутам, медиана равна 13 минутам. Солнечные вспышки идут сериями по несколько событий в группе.

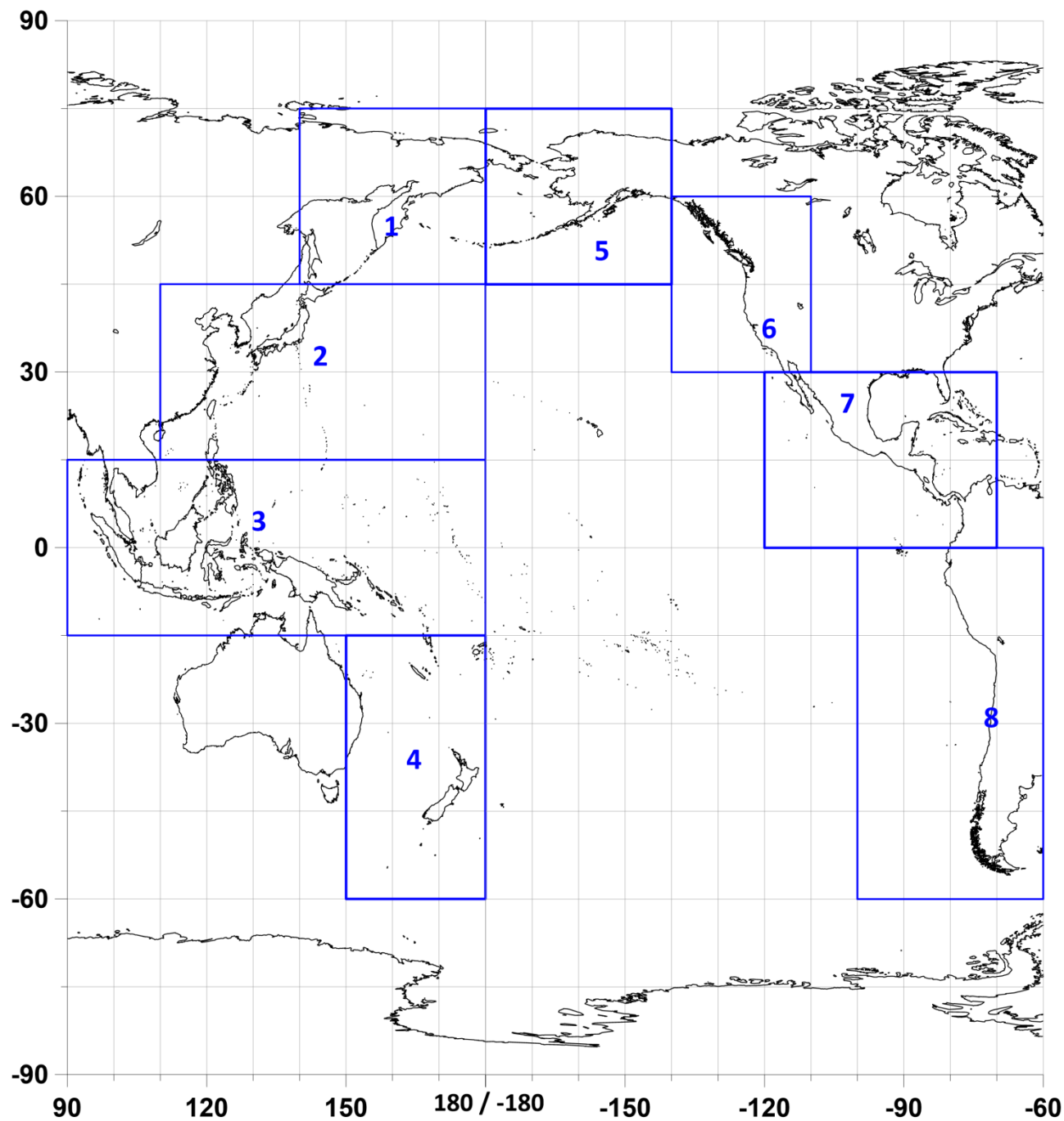
По своей временной структуре они напоминают последовательность сейсмических событий, которые группируются после каждого достаточно мощного землетрясения и формируют ряд вторичных событий (афтершоков).

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.

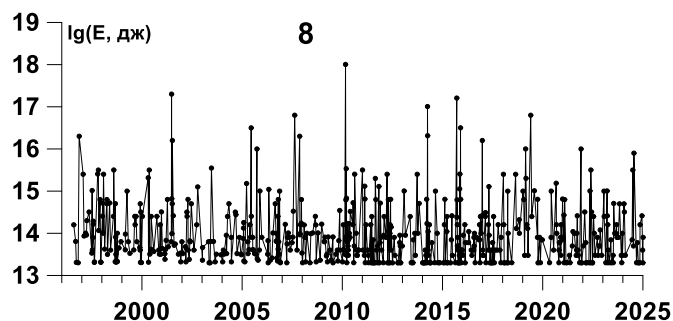
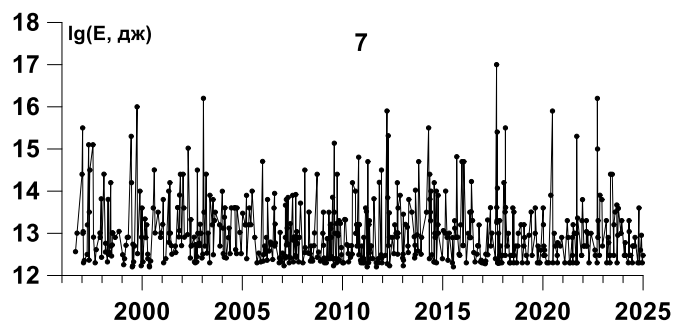
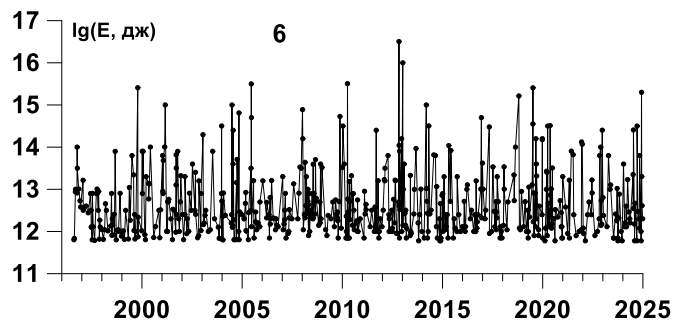
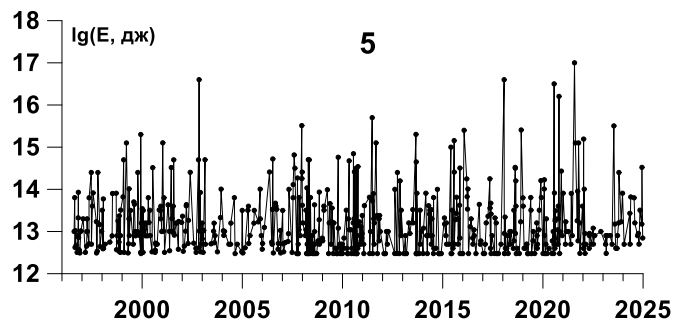
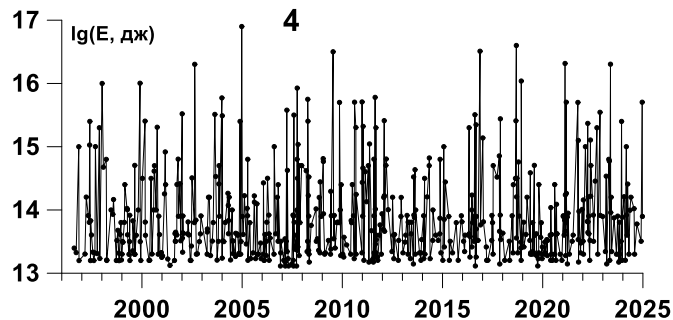
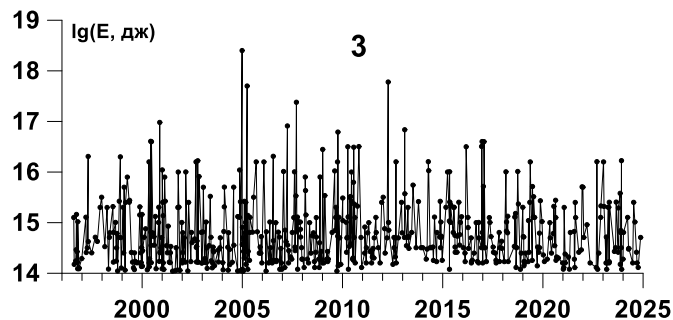
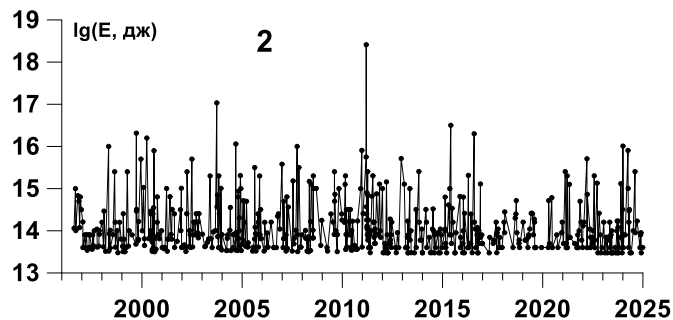
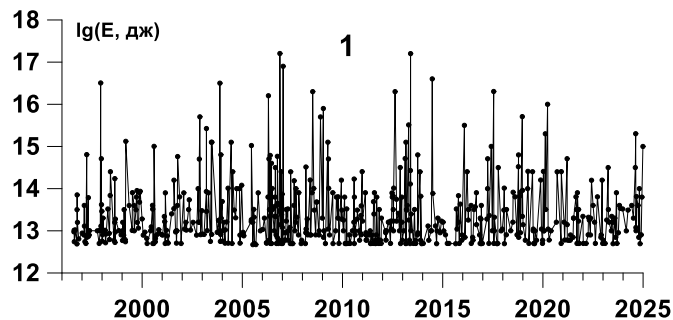
Поскольку длины временных интервалов солнечных вспышек подчиняются 11-12 годовой периодичности солнечной активности, то длина «малого» интервал времени должна быть достаточной, чтобы в период низкой солнечной активности, тем не менее, внутри этого интервала были какие-то вспышки. Такой минимальной длительностью 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



Точками представлена временная последовательность локальных максимумов суммарных значений логарифмов интенсивностей солнечных вспышек в последовательных интервалах времени длиной 5 суток.



**Восемь областей
Тихоокеанского
огненного кольца**



**Логарифмы 583
наибольших
локальных
максимумов
выделенной
сейсмической
энергии в
последовательных
интервалах
времени длиной 1
сутки в 8 регионах
Тихоокеанского
огненного кольца.**

Основная идея метода

Для каждой области находятся временные точки локальных максимумов выбросов сейсмической энергии в интервалах времени длиной 1 сутки. Число точек наибольших локальных максимумов бралось равным 583 – числу локальных максимумов суммарной энергии солнечных вспышек в интервалах времени 5 суток.

Для пары временных последовательностей временных точек локальных максимумов выброса сейсмической энергии и суммарной энергии солнечных вспышек 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 суммарной энергии солнечных вспышек относительно моментов времени локальных максимумов выброса сейсмической энергии и «обратной» мерой опережения.

Значение средней разности мер опережения дает оценку доли интенсивности временной последовательности выбросов сейсмической энергии, для которых локальные максимумы энергии солнечных вспышек является триггером.

Матрица влияния для взаимодействия 2-х точечных процессов

Пусть $t_j^{(\alpha)}$, $j=1, \dots, N_\alpha$; $\alpha=1, 2$ представляют собой моменты времен 2-х потоков событий. Представим их интенсивности в виде:

$$\lambda^{(\alpha)}(t) = b_0^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^2 b_\beta^{(\alpha)} \cdot g^{(\beta)}(t), \quad g^{(\beta)}(t) = \sum_{t_j^{(\beta)} < t} \exp(-(t - t_j^{(\beta)}) / \tau)$$

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 . 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 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 $b_0^{(\alpha)}, b_\beta^{(\alpha)}$ из условия максимума логарифмической функции правдоподобия:

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

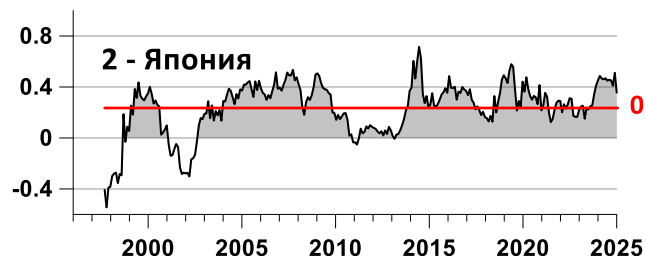
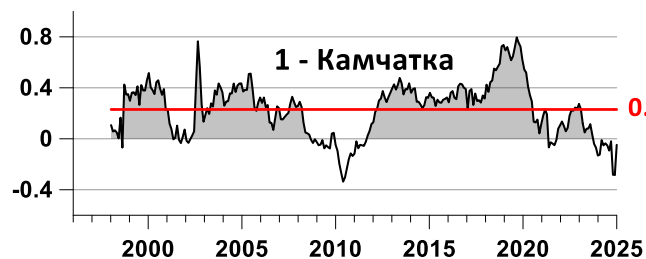
После численного решения этой задачи имеет место разложение:

$$\begin{aligned} \lambda_0^{(1)} &= N_1 / T = \lambda_0^{(1)} \cdot (\kappa_0^{(1)} + \kappa_1^{(1)} + \kappa_2^{(1)}) \\ \lambda_0^{(2)} &= N_2 / T = \lambda_0^{(2)} \cdot (\kappa_0^{(2)} + \kappa_1^{(2)} + \kappa_2^{(2)}) \end{aligned} \Rightarrow \text{Матрица влияния: } \begin{pmatrix} \kappa_0^{(1)} & \kappa_1^{(1)} & \kappa_2^{(1)} \\ \kappa_0^{(2)} & \kappa_1^{(2)} & \kappa_2^{(2)} \end{pmatrix}$$

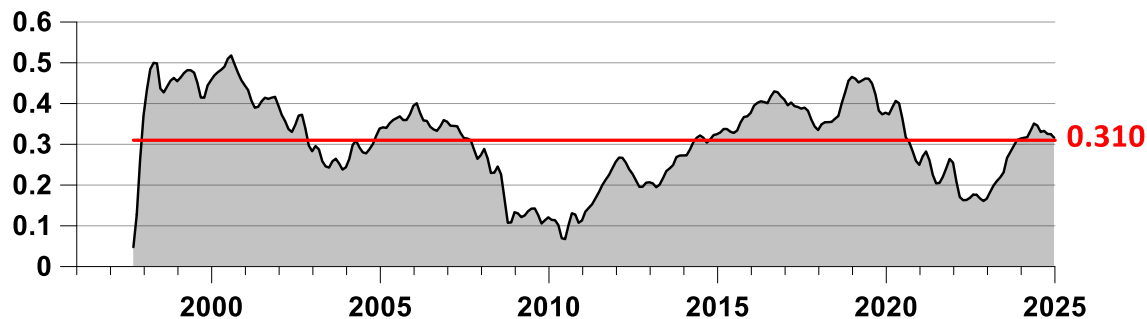
Величина $\kappa_0^{(\alpha)}$ является частью средней интенсивности $\lambda_0^{(\alpha)}$ процесса с номером α , являющейся чисто стохастической, часть $\kappa_\alpha^{(\alpha)}$ вызвана влиянием самовозбуждения $\alpha \rightarrow \alpha$ и $\kappa_\beta^{(\alpha)}, \beta \neq \alpha$ обусловлена внешним влиянием $\beta \rightarrow \alpha$. Выполняется условие нормировки: $\kappa_0^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^2 \kappa_\beta^{(\alpha)} = 1, \quad \alpha = 1, 2$.

Матрицы влияния оцениваются в скользящих временных окнах, при этом основное внимание уделяется их локальным максимумам с последующим усреднением. Пусть M_L - число длин окон в пределах от $L_{\min}$ до $L_{\max}$. Таким образом, последовательность длин окон имеет вид $L_j = L_{\min} + (j-1)\Delta L$, $j=1, \dots, M_L$ где $\Delta L = (L_{\max} - L_{\min}) / (M_L - 1)$. Каждое временное окно длины L_j скользит вдоль оси времени с взаимным смещением Δt . Пусть $t_k(L_j)$ - последовательность моментов времени, соответствующих правым концам временных окон длины L_j . Число $K(L_j)$ моментов времени $t_k(L_j)$ определяется взаимным смещением Δt временных окон длиной L_j . Пусть $(t_k(L_j), c_k^{(1)}(L_j))$ и $(t_k(L_j), c_k^{(2)}(L_j))$ - элементы $\kappa_2^{(1)}$ и $\kappa_1^{(2)}$ матрицы, соответствующие взаимным влияниям $2 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 2$ анализируемых моментов времени $t_k(L_j)$ для текущего положения временного окна длиной L_j . Пусть $(t_k^*(L_j), \hat{c}_k^{(\alpha)}(L_j))$, $\alpha = 1, 2$ - локальные максимумы $c_k^{(\alpha)}(L_j)$, т.е. $c_{k-1}^{(\alpha)}(L_j) < \hat{c}_k^{(\alpha)}(L_j) < c_{k+1}^{(\alpha)}(L_j)$. Выберем длину «маленького» временного интервала (мы использовали 0.1 года) и для последовательности таких интервалов вычислим средние значения $G_{2 \rightarrow 1}$ и $G_{1 \rightarrow 2}$ величин локальных максимумов $\hat{c}_k^{(\alpha)}(L_j)$.

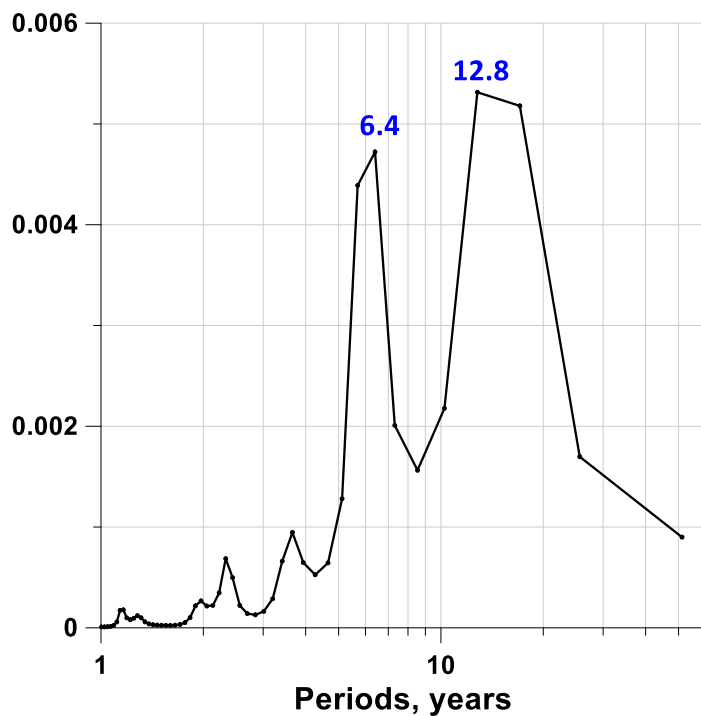
Нашей целью является вычисление разности $\Delta G = G_{2 \rightarrow 1} - G_{1 \rightarrow 2}$. В этой формуле 1-я последовательность представляет собой 583 локальных максимумов суммарной энергии солнечных вспышек в интервалах времени 5 суток, тогда как 2-я последовательность представляет собой моменты времени последовательности моментов времени 583 наибольших локальных максимумов выброса сейсмической энергии в каждой области. Если среднее значение $\langle \Delta G \rangle$ положительно, это означает, что имеет место триггерный эффект. В расчетах мы использовали значения $\tau = 0.1$ года, $L_{\min} = 1$ год, $L_{\max} = 5$ лет, $M_L = 100$, $\Delta t = 0.01$ года. Само же значение $\langle \Delta G \rangle$ дает долю интенсивности сейсмических событий, для которых поток протонов был триггером.



На графиках представлена разница между средними значениями «прямого» и «обратного» влияния для 8 регионов, 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.



Результат усреднения зависимостей от всех 8 регионов Тихоокеанского огненного кольца.



**Спектр мощности вариаций
усредненной зависимости.
Указаны значения периодов
спектральных пиков.**

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 для 8 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.