

# Изменения сейсмичности Земли под влиянием разных процессов, порождаемых солнечной активностью в околоземном пространстве

Тарасов Н.Т.

*Институт физики Земли РАН, Москва; tarasov@ifz.ru*

## Введение

Предположения о том, что изменения солнечной активности (СА) может влиять на сейсмичность Земли, выдвигались, начиная с середины XIX века. Однако широкие исследования влияния процессов, протекающих на Солнце и в околоземном пространстве, на состояние земной коры и сейсмичность начались 50-60 лет назад, когда развитие инструментальных наблюдений на Земле и в околоземном пространстве позволило получать большие объемы данных, необходимых для таких исследований. За прошедшие годы по этой теме был опубликован целый ряд работ, посвященных этой проблеме. Такой интерес обусловлен тем, что новые результаты, полученные в этом направлении, могут помочь более точно предсказывать периоды повышения сейсмической опасности на Земле, изучить воздействие на сейсмичность факторов разной физической природы и более полно понять закономерности Солнечно-Земных связей. Однако опубликованные результаты нередко носят противоречивый характер. Дискуссионными остаются также вопросы о первопрочине и физическом механизме влияния СА на сейсмичность Земли. Поэтому важно продолжить экспериментальные исследования в этом направлении.

## Методика

С этой целью были изучены и сопоставлены с вариациями СА изменения глобальной сейсмичности Земли с 1973 по 2001 гг. Такой выбор временного интервала был обусловлен наличием представительных данных о сейсмичности и ряда параметров, характеризующих СА. В качестве исходного материала для анализа сейсмичности использовался каталог глобальной сейсмичности NEIC. Он содержит дату-время,  $M_S$  - магнитуду, координаты и глубину очага 320-ти тысяч землетрясений, произошедших за рассматриваемый период. Представительными являются землетрясения с  $M_S > 4.4$ , которых оказалось более 130 тысяч. Для анализа СА использовались публикуемые NOAA каталоги геомагнитных бурь, данные о скорости солнечной плазмы ИСЗ IMP-8, орбита которого

располагалась за пределами магнитосферы Земли, и данные об интенсивности потока электромагнитного излучения (ЭИ) Солнца в радиочастотном диапазоне. Поскольку значительная часть упомянутых работ была посвящена исследованию влияния на сейсмичность геомагнитных бурь (МБ), на первом этапе было рассмотрено их влияние на глобальную сейсмичность Земли. Однако каких-либо заметных изменений сейсмичности после МБ выделить не удалось. Из этого следует, что либо такого влияния нет, либо вызванные изменения настолько малы, что их не удается обнаружить на фоне естественных вариаций сейсмичности.

Поэтому для выделения возможных изменений сейсмичности применялась методика наложения эпох. Сейсмичность рассматривалась в пределах временных окон шириной  $\pm 30$  сут от начала каждой из бурь, которые затем совмещались во времени. В качестве реперов для выбора таких окон использовались времена начала каждой из геомагнитных бурь. Дата и время всех землетрясений, возникших в пределах таких окон, заменялось на время, пересчитанное относительно момента начала соответствующей бури, а по их магнитудам  $M_S$  с помощью известного соотношения

$$\lg E = 1.5 \cdot M_S + 4.8 \quad (1)$$

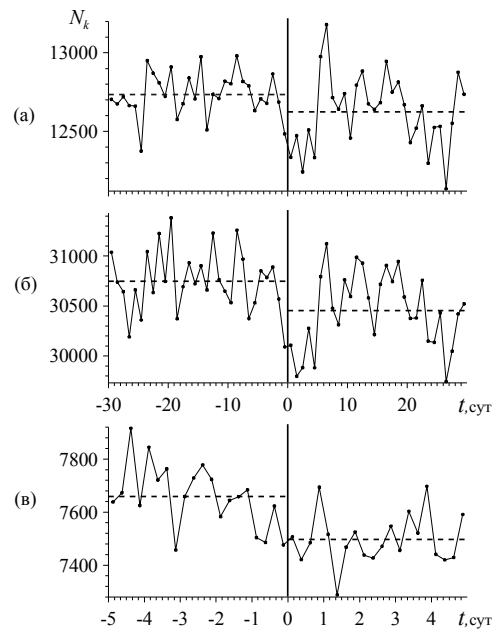
вычислялась его энергия (Дж), после чего все они объединялись в общий подкаталог.

Далее временное окно разбивалось на короткие последовательные интервалы, и по полученному подкаталогу подсчитывались суммарная сейсмическая энергия и число землетрясений, возникших в пределах каждого из них, а также вычислялись средняя энергия этих землетрясений и время, соответствующее середине каждого из таких интервалов, отсчитываемое от момента начала МБ. Затем строились зависимости количества землетрясений и их средней энергии от времени и оценивались средние значения этих величин за все время перед магнитными бурями (уровень фона) и их средние значения после начала МБ. Определялась

также суммарная сейсмическая энергия (СЭ) всех землетрясений, произошедших до и после МБ. Для оценки статистической значимости изменения среднего количества землетрясений и их энергии после магнитных бурь использовался непараметрический критерий Вилкоксона, который позволяет получать оценки значимости изменений по выборкам величин с любым видом распределений.

### Результаты

Сначала с помощью такой методики было изучено изменение во времени количества землетрясений. На рис. 1 представлены осредненные по 1071 МБ зависимости ежесуточного количества землетрясений от времени до и после МБ, полученные как по землетрясениям только представительных магнитуд, так и по всем сейсмическим событиям, представленным в каталоге.



**Рис. 1.** Изменение глобальной сейсмичности Земли в интервале  $\pm 30$  сут до и после магнитных бурь с внезапным началом. По оси абсцисс - ежесуточное количество землетрясений, по оси ординат - время, отсчитываемое от внезапного начала (сут). а - землетрясения только представительных магнитуд, б - все землетрясения, представленные в каталоге NEIC, и в - аналогичная зависимость, построенная во временном окне  $\pm 5$  сут с более высоким разрешением по времени. Вертикальной чертой отмечено время внезапного начала, пунктирными линиями - среднее число землетрясений до и после него.

Из него следует, что в первые 5 сут после МБ происходит заметное уменьшение количества землетрясений, а через 5-6 сут их число вновь возрастает, оставаясь при этом ниже уровня фона. Однако отмеченное понижение сейсмичности началось, как минимум, за 2-3 сут до начала

магнитных бурь. Более детальный анализ показывает, что уменьшение количества землетрясений начинается за 3-5 сут до МБ (см. рис.1,в). Поэтому в это время магнитные бури не могли быть его причиной.

Магнитные бури возникают на Земле через несколько суток после солнечных вспышек и корональных выбросов масс, что обусловлено относительно невысокой скоростью распространения солнечной плазмы. Однако электромагнитное излучение Солнца (ЭИ) достигает Земли всего за 8.2 мин, что позволяет предположить, что оно и является причиной изменения сейсмичности до МБ.

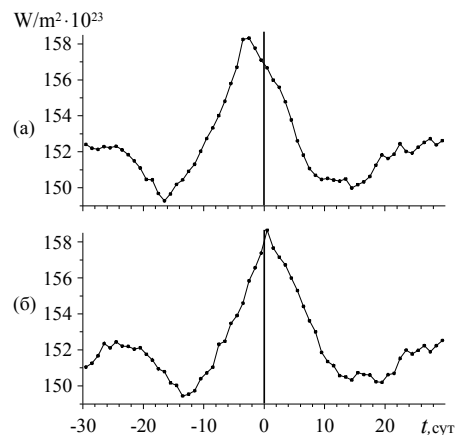
По данным спутника IMP-8 скорость фронта солнечной плазмы на границе магнитосферы Земли во время возникновения рассматриваемых магнитных бурь лежала в пределах 309 - 1040 км/сек. Следовательно, время запаздывания МБ относительно всплеска ЭИ должно лежать в пределах 1.6-5.6 сут. Это хорошо согласуется со временем, на которое спад сейсмичности опережает начало МБ (Рис. 1).

Поэтому по той же методике было рассмотрено изменение потока излучения Солнца в радиочастотном диапазоне, которое часто используется как мера его ионизирующего излучения (ультрафиолетового, рентгеновского и др.), и индикатор плотности заряженных частиц в ионосфере. На рис. 2а представлено изменение ЭИ до и после МБ. Видно, что интенсивность потока имеет единственный максимум, который опережает МБ на трое суток, что совпадает по времени с началом подавления сейсмичности на рис.1а и 1б. Все это подтверждает высказанное выше предположение.

В связи с этим интересна зависимость потока ЭИ от времени до и после тех событий на Солнце, которые послужили причиной возникновения рассматриваемых магнитных бурь (рис. 2б). Времена их начала определялись как

$$T_j = t_j - S_c / v_j, \quad (2)$$

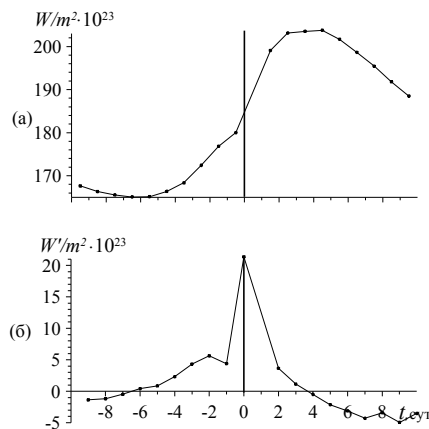
где  $t_j$  - время  $j$ -той МБ, взятое из каталога магнитных бурь,  $v_j$  - скорость фронта солнечной плазмы, зафиксированная в это же самое время на границе магнитосферы Земли спутником IMP-8, и  $S_c$  - расстояние от Солнца до Земли. На рис. 2б видно, что этот максимум становится более острым и совпадает по времени с солнечными событиями, ставшими причиной магнитных бурь. Следовательно, всплески интенсивности ЭИ должны более точно отражать моменты воздействия электромагнитного излучения Солнца на сейсмичность Земли.



**Рис.2.** Изменение интенсивности потока радиоизлучения Солнца до и после магнитных бурь (а) и после солнечных событий, послуживших причиной их возникновения (б).

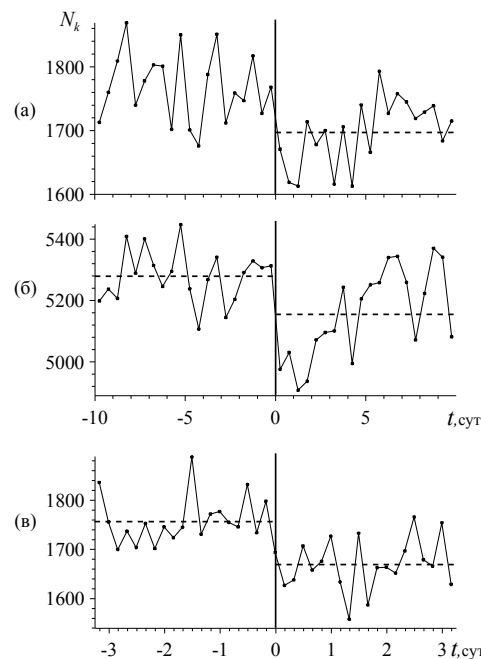
Поэтому вместо магнитных бурь в качестве реперов для выбора временных окон были использованы моменты резкого повышения интенсивности ЭИ. Формально такие моменты определялись как времена, когда скорость изменения потока радиоизлучения Солнца ( $dW/dt$ ) превышала 95%-ный доверительный интервал. На рисунке 3 представлены зависимости от времени потока электромагнитного излучения Солнца (а) и скорости его изменения до и после резких всплесков его интенсивности. Видно, что они четко отмечаются резкими максимумами скорости изменения потока. Всего было обнаружено 949 резких всплесков ЭИ, что сопоставимо с числом магнитных бурь.

На рис. 4 показана зависимость от времени количества землетрясений до и после этих всплесков, полученная по землетрясениям представительных магнитуд (рис. 4а) и по всем событиям в каталоге (рис.4б). На них хорошо видно, что после повышения интенсивности ЭИ происходит резкое уменьшение количества землетрясений, которое совпадает с ними по времени (еще лучше это видно на рис. 3в, где показан фрагмент последней зависимости шириной  $\pm 3$  сут, построенный с более высоким разрешением по времени). Сразу же после всплесков количество земле-



**Рис. 3** Изменение потока ( $W/m^2$ ) радиоизлучения Солнца (а) и его скорости  $d(W/m^2)/dt$  (б) до и после резких повышений его интенсивности.

трясений падает, а через 2-3 сут начинает плавно возрастать. Тем не менее, на протяжении 10 сут их число остается ниже уровня фона.



**Рис.4.** Изменение во времени количества землетрясений представительных магнитуд (а) и всех представленных в каталоге событий (б), в интервале  $\pm 10$  сут до и после резких повышений мощности ЭИС и аналогичная зависимость, построенная в окне  $\pm 3.2$  сут с более высоким разрешением по времени (в). Обозначение те же, что и на рис. 1.

В таблице 1 представлены численные оценки изменения количества землетрясений, которые наблюдались на рисунках 1 и 4. Из нее следует, что уменьшение числа сейсмических событий после МБ составляет всего около одного процента от уровня фона. Более сильное воздействие оказывают всплески ЭИ, особенно в первые трое суток. После них наблюдается уменьшение количества землетрясений почти на 6%. Несмотря на то, что выявленные изменения сейсмичности очень невелики, статистически они высоко значимы. Это видно из представленных в таблице оценок их статистической значимости, которые оказались много меньше значения 0.05, обычно принимаемого в геофизике за уровень значимости.

Эти результаты показывают, что подавление сейсмичности еще до начала МБ обусловлено влиянием всплесков ионизирующего электромагнитного излучения Солнца. Однако их недостаточно чтобы понять,

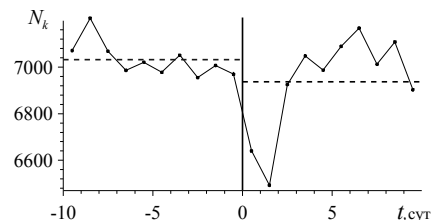
происходит ли дальнейший спад сейсмической активности Земли только под влиянием ЭИ, или МБ также вносят свой вклад в этот процесс. Нельзя исключить, что электромагнитные всплески вызывают длительное уменьшение количества землетрясений, на фоне которых возникают магнитные бури, воздействие которых к подавлению сейсмичности не приводит.

**Таблица 1.** Изменения среднего количества землетрясений ( $\Delta N$ ) и их статистическая значимость ( $P$ ) после МБ и всплесков ЭИ в пределах временных окон шириной  $\pm 10$  и  $\pm 3$  сут.

Триггер	$\Delta N, \%$	$P$
МБ	-1.1	0.0023
ЭИ	-2.5	0.0002
ЭИ ( $\pm 3$ с)	-5.7	0.0001

Поэтому изменение количества землетрясений было изучено по выборке ЭИ, после которых в течение 3 суток не фиксировались МБ. Полученная при этом зависимость (рис. 5) показывает, что после ЭИ, за которыми не последовало МБ, происходит резкое подавление сейсмичности, которое продолжается всего около 2 суток. Следовательно, более длительное подавление сейсмичности после МБ обусловлено их собственным воздействием. Таким образом, и после МБ, и после ЭИ наблюдается некоторое подавление глобальной сейсмичности Земли.

**Рис. 5.** Изменение во времени количества землетрясений, произошедших до и после интенсивных всплесков электромагнитного излучения Солнца, поле которых трое суток не фиксировалось магнитных бурь.

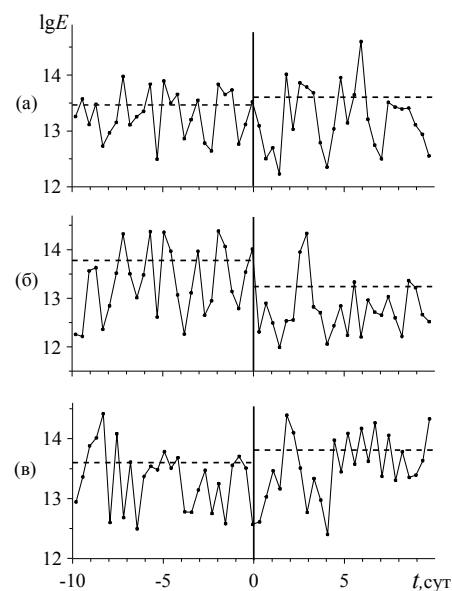


Интересно, что при этом средняя и суммарная энергия землетрясений возрастает, причем не на несколько процентов, как это было с количеством землетрясений, а на десятки, что следует из таблицы 2, где представлены их оценки. Однако такие изменения статистически не значимы (т.к. значимость существенно больше 0.05). С чем это может быть связано показывает зависимость от времени средней энергии землетрясений до и после ЭИ на рис. 6а. На нем видно, что после ЭИ средняя энергия землетрясений изменяется во времени очень неупорядоченно. В первые

двое суток она заметно уменьшается относительно уровня фона. В следующие двое суток, напротив, возрастает, затем опять падает и т.д. При этом ее дисперсия возрастает.

**Таблица 2.** Изменения средней энергии землетрясений ( $\Delta E$ ) после МБ и ЭИ, их статистическая значимость ( $P$ ) и отношение суммарной энергии ( $E_a/E_b$ ) землетрясений, возникших после и до них, и аналогичные оценки, полученные по выборке МБ, до и после которых не фиксировалось ЭИ, и выборке ЭИ, до и после которых не наблюдалось МБ.

Триггер	$\Delta E, \%$	$P$	$E_a/E_b$
МБ все	57.1	0.082	1.55
ЭИ все	33.6	0.089	1.32
МБ без ЭИ	58.5	0.049	1.52
ЭИ без МБ	-70.8	0.043	0.27



**Рис. 6.** Изменение во времени средней энергии землетрясений до и после интенсивных всплесков электромагнитного излучения Солнца (а), аналогичная зависимость, полученная по всплескам, до и после которых не возникало магнитных бурь (б), и изменение средней энергии землетрясений до и после МБ, до и после которых не фиксировалось всплесков ЭИС.

Можно предположить, что это происходит в результате противоположного влияния на среднюю энергию землетрясений двух рассматриваемых факторов - МБ и ЭИ. Однако оценки изменения средней энергии после МБ и ЭИ, на первый взгляд, это не подтверждают (см. таб. 2). Тем не менее, нельзя исключить, что это связано с большими погрешностями

их определения, которые и послужили причиной их низкой статистической значимости. Поэтому влияние этих двух факторов на энергетические характеристики сейсмичности было изучено по отдельности.

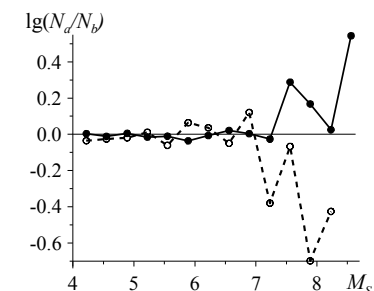
Сначала с этой целью из общего числа ЭИ были отобраны только те, до и после которых не возникало МБ. Используя полученную при этом выборку в качестве реперов для выбора временных окон, по той же самой методике что и раньше, было изучено изменение во времени средней и суммарной энергии землетрясений до и после электромагнитных всплесков. На рисунке 6б, где показано ее изменение во времени, видно, что сразу же после электромагнитных всплесков происходит резкое уменьшение энергии землетрясений.

Аналогично было изучено изменение средней энергии после магнитных бурь. Из их общего числа была произведена выборка только тех бурь, до и после которых не фиксировалось интенсивных всплесков ЭИ, и построена зависимость, характеризующая изменение средней энергии землетрясений до и после магнитных бурь в отсутствие ЭИ (рис. 6в). В отличие от предыдущего случая, здесь наблюдается повышение средней энергии землетрясений, которое происходит после магнитных бурь с задержкой в несколько суток.

Численные оценки наблюдаемых на рис. 6б и 6в изменений средней энергии землетрясений ( $\Delta E$ ) после ЭИ и МБ также представлены в таблице 2. Из нее следует, что воздействие ЭИ приводит к уменьшению средней энергии землетрясений относительно уровня фона почти на 71%, а магнитных бурь - к ее увеличению на 58.5 %, и эти изменения оказались уже статистически значимы, поскольку в обоих случаях значимость оказалась меньше 0.05. Такие же выводы следуют и из анализа представленных в этой же таблице значений отношения суммарной энергии всех землетрясений, произошедших после и до ( $E_a/E_b$ ) МБ и ЭИ. Таким образом, после всплесков ЭИ происходит не только уменьшение количества землетрясений, но и их энергии. Однако после МБ число сейсмических событий также несколько уменьшается, но при этом их энергия, напротив, существенно возрастает.

Для практических приложений важно получить представление о том, как при этом землетрясения перераспределяются по своим энергиям. С этой целью по землетрясениям разных магнитуд  $M_S$  был произведен подсчет их числа до ( $N_b$ ) и после ( $N_a$ ) ЭИ и отношения  $N_a/N_b$ , характеризующего изменение количества таких сейсмических событий после

всплесков ЭИ. На рисунке 7 эти отношения представлены в зависимости от магнитуд землетрясений. На нем же представлена аналогичная зависимость отношения  $N_a/N_b$  количества землетрясений, возникших после и до магнитных бурь.



**Рис. 7.** Отношение количества землетрясений ( $N_a/N_b$ ), возникших после и до всплесков электромагнитного излучения (пунктир), и после и до геомагнитных бурь, (сплошная линия), в зависимости от их магнитуды.

Из него следует, что количество слабых и умеренных сейсмических событий с  $M_S < 7$  как после ЭИ, так и после МБ, меняется очень незначительно. При этом число сильных землетрясений с  $M_S \geq 7$  после ЭИ почти в 4 раза уменьшается, а после МБ, напротив, более чем в 3 раза возрастает. Последнее обстоятельство согласуется с результатами работ [1-3], в которых отмечалось, что после магнитных бурь происходит активизация землетрясений с  $M_S > 6.5-7.0$ .

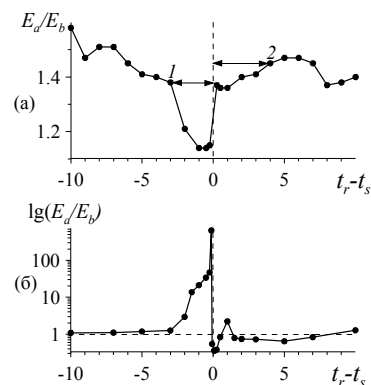
Нужно еще раз отметить, что эти результаты были получены только по тем ЭИ, до и после которых не возникало МБ и, аналогично, по тем МБ, до и после которых не фиксировалось резких всплесков ЭИ. Однако всплески ионизирующего излучения Солнца и магнитные бури нередко возникают почти одновременно или с небольшими задержками во времени друг относительно друга. При этом остается неясным, к каким изменениям энергетических параметров сейсмичности может приводить их комбинированное воздействие. Чтобы понять это, было изучено изменение  $E_a/E_b$  - отношения суммарной сейсмической энергии землетрясений, произошедших после и до МБ, в зависимости от того, как долго перед ними или после них не фиксировалось резких всплесков ЭИ.

С этой целью по той же методике были выполнены оценки отношения  $E_a/E_b$  по выборкам МБ, перед или после которых в пределах временных интервалов разной длительности не фиксировалось всплесков ЭИ. Длительность таких интервалов варьировалась от 0.125 до 10 сут от моментов возникновения каждой из МБ. На рис. 8а полученные значения  $E_a/E_b$  представлены в виде зависимости от длительности интервалов, от-

считываемых от момента возникновения МБ, в пределах которых не фиксировалось ЭИ. Так например, значение  $E_a/E_b$ , отмеченное цифрой 1, получено по выборке МБ, перед которыми в интервале времени, отмеченного стрелкой, не было ЭИ, а значение 2 получено по выборке МБ, после которых ЭИ не фиксировались в интервале, отмеченным другой стрелкой, и т.д. На этом рисунке видно, что в зависимости от того, как долго перед или после МБ не наблюдались ЭИ, значения  $E_a/E_b$ , в основном, менялись от 1.4 до 1.6, что хорошо согласуется с оценками, представленными в таблице 2.

Однако, если в интервале трех и менее суток перед МБ всплесков не наблюдалось, значения  $E_a/E_b$  становились меньше 1.2, т.е. эффективность воздействия бурь на сейсмичность существенно снижалась. Интересно посмотреть, как она может измениться, если в этом интервале всплески ЭИ присутствовали. Для этого методика анализа комбинированного воздействия была несколько модифицирована. Из общего числа отбирались те МБ, перед или после которых в пределах задаваемых интервалов, электромагнитные всплески не отсутствовали, а наоборот, присутствовали, тогда как в остальное время их не возникало.

**Рис. 8.** Отношение энергии землетрясений после и до магнитных бурь ( $E_a/E_b$ ) в зависимости от длительности временных интервалов, в которых не возникало всплесков электромагнитного излучения Солнца (а), и, напротив - в которых такие всплески фиксировались, а в остальное время не возникало (б).

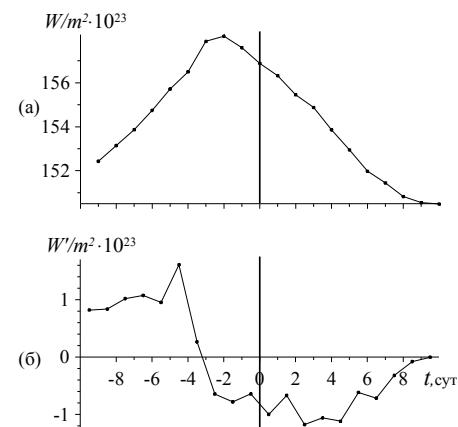


Полученные при этом значения  $E_a/E_b$  представлены на рисунке 8б. Из него следует, что появление ЭИ за 8-10 суток перед МБ практически полностью нейтрализуют воздействие на сейсмичность магнитных бурь, так как отношение  $E_a/E_b$  в этом случае становится близким к 1. Однако, если такие всплески появляются перед МБ за трое суток и менее, после магнитных бурь происходит очень сильное повышение суммарной сей-

смической энергии землетрясений. В этом случае отношение  $E_a/E_b$  достигает значения, равного 644.

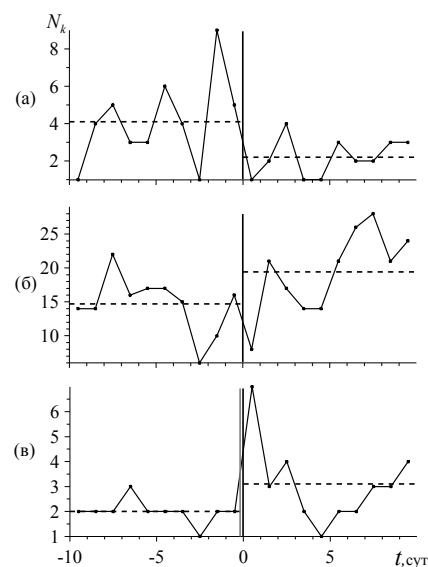
Понять, с чем может быть связано такое поведение эффективности воздействия МБ на сейсмичность в пределах трехсуточного интервала до их начала позволяют рисунки 9а и рис. 9б, на которых показаны, соответственно, изменения во времени потока ЭИ и скорости его изменения. Видно, что на протяжении, как минимум, 10-и суток поток возрастает, а за трое суток до МБ рост прекращается и начинается его уменьшение (см. также рис.2). Еще более четко это видно на графике изменения скорости потока ЭИ (рис. 9б). Для практических целей наиболее важным является тот факт, что воздействие МБ, которые в трехсуточном интервале предваряются резкими всплесками ЭИ, вызывают повышение суммарной энергии землетрясений почти на 3 порядка.

**Рис. 9.** Изменение потока радиоизлучения Солнца (а) и скорости его изменения (б) до и после геомагнитных бурь.



Эти результаты были проверены и другим способом. Для этого были построены зависимости от времени количества сильных землетрясений с магнитудой  $M_S > 7$  до и после ЭИ и МБ. Но поскольку таких сильных землетрясений относительно немного, период наблюдений был расширен. Рассматривались сейсмические события, произошедшие в интервале 1973-2020 гг. Всего таких землетрясений оказалось 349. При этом, как и раньше, в качестве реперов для выбора временных окон использовались выборки ЭИ, до и после которых не было МБ, и выборки МБ, до и после которых не фиксировалось всплесков ЭИ.

Полученные при этом зависимости количества землетрясений от времени даны на рисунке 10. Там же показаны средние значения числа землетрясений до (уровень фона) и после воздействия рассматриваемых факторов. На нем хорошо видно, что сразу же после всплесков ионизирующего излучения Солнца число землетрясений с  $M_S > 7$  заметно уменьшается (рис. 10а). После геомагнитных бурь, напротив, наблюдается активизация таких землетрясений, которая возникает с задержкой в несколько суток (рис. 10б). Однако после МБ, перед которыми в течение трех суток и менее фиксировались всплески ЭИ, а в остальное время их не наблюдалось, возникает резкая активизация землетрясений с  $M_S > 7$ , которая продолжается всего около трех суток (рис. 10в). В отличие от предыдущего случая (рис. 10б), она начинается сразу же после МБ, без заметной задержки.



**Рис. 10.** Изменение во времени количества землетрясений с  $M_S > 7$ , произошедших до и после ЭИ (а), МБ (б) с 1973 г. по 2020 г. и одновременного воздействия этих двух факторов (в).

Численные оценки изменения среднего количества таких землетрясений представлены в таблице 3. Из нее следует, что воздействие ЭИ приводит к статистически значимому уменьшению количества землетрясений с  $M_S > 7$  на 46% от уровня фона. После магнитных бурь их число, напротив, статистически значимо возрастает на 32%. Но наиболее сильный прирост числа землетрясений (на 55%) происходит после МБ, непо-

средственно перед которыми появлялись интенсивные всплески ионизирующего излучения Солнца. Однако в этом случае значимость очень мала. Связано это с тем, что наблюдаемая активизация сейсмичности продолжается всего трое суток. В этом временном интервале возрастание числа землетрясений по отношению к фону достигает уже 133%, а оценка значимости составляет 0.035.

**Таблица 3.** Изменение во времени количества землетрясений с  $M_S > 7$ , произошедших на Земле за период 1973-2020 гг., до и после интенсивных всплесков электромагнитного излучения Солнца (ЭИ), геомагнитных бурь (МБ), а также и до и после одновременного воздействия этих двух факторов (ЭИ и МБ), и то же самое во временном интервале  $\pm 3$  суток.

Триггер	$\Delta N, \%$	$P$
ЭИ	-46.3	0.024
МБ	32.0	0.013
ЭИ и МБ	55.0	0.154
то же, 3 сут	133.3	0.035

### Заключение

Полученные результаты прежде всего показывают, что процессы, протекающие на Солнце, оказывают влияние на сейсмичность Земли и, следовательно, на состояние ее литосферы. Однако картина их взаимодействия очень сложная. Факторы разной физической природы, порождаемые солнечной активностью, могут влиять на литосферу Земли и ее сейсмичность разнонаправленно. Воздействие интенсивных всплесков ЭИ приводит к уменьшению вероятности возникновения катастрофических землетрясений почти в два раза, а магнитных бурь, напротив, к повышению такой вероятности почти на треть. Но наиболее сильно, более чем в два раза, она возрастает после магнитных бурь, перед возникновением которых в течение трехсуточного интервала фиксировались всплески интенсивности ионизирующего излучения Солнца. Следовательно, характер воздействия этих факторов на состояние литосферы и ее сейсмичность может меняться в зависимости от их сочетания.

Нужно отметить, представленные результаты влияния МБ и ЭИ отражают лишь общие тенденции изменения сейсмичности Земли, поскольку анализировались землетрясения, произошедшие в пределах разных тектонических и геологических структур, которые могли находиться в разном напряженно-деформированном состоянии, с разным

флюидным режимом и т.д. То же можно сказать и о самих МБ и ЭИ, которые порождались разными событиями на Солнце. Поэтому полученных данных пока недостаточно для объяснения столь сложного характера изменения сейсмичности под влиянием этих факторов. Требуются более детальные исследования. Однако сопоставление с некоторыми результатами, полученными в совершенно других условиях, позволяют сделать некоторые предположения.

После ЭИ подавление сейсмичности наблюдается без заметной задержки, а ее активизация после МБ происходит только через 2-5 суток. Последнее обстоятельство отмечалось и раньше при искусственном облучении земной коры мощными электромагнитными импульсами, после которых активизация сейсмичности также возникала с задержкой в 2-5 суток [4-6]. Кроме того, облучение приводило к повышению скорости сейсмоструктурных деформаций, вносящих свой вклад в процесс квазипластического деформирования коры, что ускоряло релаксацию накопленных в ней упругих напряжений [5,6].

Всплески ЭИ вызывают повышение ионизации ионосферы, что влияет на параметры глобальной электрической цепи, приводит к изменению активности мировых грозных центров, ухудшают условия распространения радиоволн от естественных и техногенных источников. Это снижает интенсивность электромагнитного фона на огромных территориях и уменьшает его триггерное воздействие на сейсмичность, что может вызвать ее подавление и замедлить релаксацию упругих напряжений в коре. Косвенно это подтверждается результатами работы [7], в которой изучались изменения интенсивности геоакустической эмиссии и сверхнизкочастотных электромагнитных полей в глубоких скважинах, и был обнаружен эффект модуляции интенсивности эмиссии горных пород электромагнитными полями.

Во время МБ также ухудшается распространение радиоволн. Тем не менее, они оказывают более сильное триггерное воздействие на области подготовки сильных землетрясений. Одной из причин этого могут быть теллурические токи, индуцируемые в земной коре изменениями геомагнитного поля. Их воздействие на нестабильные области земной коры может инициировать сильные землетрясения [2,3]. Другой причиной может быть явление магнитоластики [8,9]. Скорость пластического течения массивов горных пород может изменяться при изменении гео-

магнитного поля, что также должно оказывать триггерное воздействие на нестабильные участки земной коры.

### Литература

1. Барсуков О.М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. № 12. С. 93-97
2. Тарасов Н.Т. Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли // Инженерная физика. 2019. № 6. С. 23-33. DOI: 10.25791/infizik.06.2019.668.
3. Соболев Г.А. Влияние больших магнитных бурь на возникновение больших землетрясений // Физика Земли. 2021. № 1. С.20-36. DOI: 10.31857/S0002333721010087.
4. Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии. // Доклады РАН. 1997. т. 353. № 4, с.542-545.
5. Тарасов Н.Т. Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сейсмоструктурных деформаций. // Доклады РАН. 2010. т.433. № 5. С. 689-692. DOI: 10.1134/S1028334X10080210.
6. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмоструктурных деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // Физика Земли. 2011. № 10. С. 82-96. DOI: 10.1134/S1069351311100120.
7. Gavrilov V.A. On the mechanism of intensity variations of geoaoustic emission caused under the action of audio-frequency electromagnetic field // Russian journal of earth sciences. 2014. Vol. 14. ES2003. Doi:10.2205/2014ES000541. P. 1-15.
8. Бучаченко А.Л. Микроволновое стимулирование пластичности в очаге землетрясения // Химическая физика. 2010. Т. 29. № 9. С. 9-12.
9. Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // УФН. 2014. Т. 184. № 1. С. 101-108.