

УДК 523.98 + 550.37 + 551.510.535

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СИСТЕМЕ “ИОНОСФЕРА—АТМОСФЕРА—ЛИТОСФЕРА” И ИХ ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2024 г. В. А. Новиков<sup>1,2, \*</sup>, В. М. Сорокин<sup>3, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики геосфер РАН им. академика М.А. Садовского, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова,  
г. Москва, Россия

\*E-mail: novikov@ihed.ras.ru

\*\*E-mail: sova@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

Выполненные ранее численные исследования влияния солнечных вспышек класса X на сейсмическую активность показали, что поглощение рентгеновского излучения солнечной вспышки в ионосфере может вызвать пульсации геомагнитного поля до 100 нТ и соответствующую генерацию теллурических токов в разломах земной коры с плотностью до  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>, которая сопоставима с плотностью тока, создаваемого в земной коре искусственными импульсными источниками и приводящего к инициированию слабых землетрясений на Памире и Северном Тянь-Шане. Для проверки данных численных результатов проведен анализ возможного воздействия 50 сильнейших вспышек класса X (1997–2023 гг.) как на глобальную сейсмическую активность, так и на зоны подготовки землетрясений, расположенные только на освещенной части земного шара. Методом наложения эпох установлено повышение количества землетрясений с  $M \geq 4.5$  в течение 10 суток после солнечной вспышки, особенно в области с радиусом 5000 км вокруг подсолнечной точки (до 68% при классе вспышки >X5), по сравнению с аналогичным периодом до нее. Анализ афтершоковой активности сильного Суматра-Андаманского землетрясения ( $M = 9.1$ , 26.12.2004 г.) показал, что количество афтершоков с магнитудой  $M \geq 2.5$  возросло более чем в 17 раз после солнечной вспышки класса X10.1 (20.01.2005 г.) с задержкой 7–8 суток. Кроме того показано, что солнечные вспышки класса X2.3 и M3.64, произошедшие после Дарфилдского землетрясения ( $M = 7.1$ , 03.09.2010 г., Новая Зеландия), в области подсолнечных точек которых находилась афтершоковая зона, вероятно, вызвали три сильных афтершока ( $M6.3$ ,  $M5.2$  и  $M5.9$ ) с одной и той же задержкой 6 суток на разломе Port Hills, который является наиболее чувствительным к внешнему электромагнитному воздействию с точки зрения его электропроводности и ориентации. С учетом концепции прогноза землетрясений на основе триггерных воздействий, предложенной Г.А. Соболевым, обсуждается возможность использования полученных результатов для краткосрочного прогноза в качестве дополнительной информации наряду с известными предвестниками.

*Ключевые слова:* солнечная вспышка, рентгеновское излучение, ионосфера, теллурические токи, электромагнитное инициирование землетрясений, краткосрочный прогноз.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050078>, EDN: EJWLDI

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема возможной взаимосвязи солнечной активности, сопровождающейся магнитными бурями, и сейсмичности Земли обсуждается уже более 170 лет (см., например, [Соболев

и др., 2001; 2021; Закржевская, Соболев, 2002; Anagnostopoulos et al., 2021]). Несмотря на довольно большое количество публикаций по данной тематике, окончательное заключение о возможности инициирования землетрясений (ЗТ) солнечными вспышками (СВ) или

геомагнитными бурями (ГМБ) до сих пор не сделано. Результаты, полученные к настоящему времени, являются довольно размытыми, а в ряде случаев – противоречивыми, при этом ряд авторов вообще отрицают существование взаимосвязи между процессами на Солнце и в литосфере, приводящей к возникновению ЗТ [Love, Thomas, 2013; Akhoondzadeh, De Santis, 2022]. Необходимо отметить, что во всех предыдущих исследованиях использовался только статистический анализ рядов наблюдений геофизических данных (чисел Вольфа, параметров солнечного ветра, вариаций геомагнитного поля) и сейсмических каталогов, когда проверялась гипотеза наличия или отсутствия возможной корреляции (положительной или отрицательной) между солнечной активностью и сейсмичностью Земли. Физические механизмы солнечно-земных связей, объясняющих возможное инициирование ЗТ, не рассматривались, а на их возможное существование указывалось только феноменологически, когда в результате анализа обнаруживалась статистически значимая связь между солнечной активностью и предполагаемым откликом на нее сейсмичности Земли. Такой упрощенный подход к изучению солнечно-земных связей может дать в результате ложные результаты и привести к некорректным заключениям, при этом на их основе не могут быть даны практические рекомендации по снижению сейсмической опасности.

В отличие от чисто статистического подхода, в ряде работ, опубликованных в последнее время [Sorokin et al., 2019; 2023; Novikov et al., 2020; Новиков и др., 2023], рассматривается возможный физический механизм инициирования ЗТ электромагнитным (ЭМ) воздействием на зону его подготовки, обусловленным рентгеновским излучением сильных солнечных вспышек (СВ) класса X (пиковый поток излучения  $\geq 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>). Предложенная в этих работах физическая модель основана на механизме генерации геомагнитных пульсаций, связанных с локальным изменением проводимости ионосферы ионизирующим излучением СВ в присутствии внешних электрического  $\mathbf{E}_{\text{ext}}$  и магнитного  $\mathbf{B}_{\text{ext}}$  полей. В процессе ионизации ионосферы излучением СВ с коротким фронтом нарастания ее амплитуды в резонаторе “Земля–ионосфера” формируются колебания геомагнитного поля. Внешнее электрическое поле в ионосфере  $\mathbf{E}_{\text{ext}}$  направлено параллельно земной поверхности. Изменение проводимости ионосферы приводит к возмущению ионосферных токов и, соответственно, к генерации возмущения магнитного

и электрического полей. В проводящей ионосфере возмущение электрического поля  $\mathbf{e}$  удовлетворяет уравнению:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{e}) + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t) \mathbf{e} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t) \mathbf{E}_{\text{ext}},$$

где  $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t)$  – тензор возмущенной проводимости ионосферной плазмы. Выше проводящего слоя ионосферы возмущение электрического поля удовлетворяет уравнению:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{e})_{\perp} + \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \mathbf{e}_{\perp}}{\partial t^2} = 0,$$

где  $u$  – скорость Альвена; знак  $\perp$  обозначает поперечные компоненты вектора. В земле с проводимостью  $\sigma_g(\mathbf{r})$  возмущение электрического поля удовлетворяет уравнениям:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{e}) + \mu_0 \sigma_g(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} = 0.$$

Так как горизонтальный масштаб изменения проводимости ионосферы значительно превышает вертикальный, уравнение поля в ионосфере заменяется граничным условием. Ионизация ионосферы осуществляется импульсным потоком монохроматического излучения СВ, частота которого совпадает с максимумом спектра излучения. В данной математической модели для расчета поля и тока в литосфере [Sorokin et al., 2023] применяются существующие модели электрофизических параметров ионосферы.

С использованием разработанных физической и математической моделей взаимодействия рентгеновского излучения СВ с системой “ионосфера–атмосфера–литосфера” было показано, что кратковременное воздействие СВ должно приводить к сильным пульсациям геомагнитного поля до 100 нТ с периодом 1–100 с, что может вызывать резкий всплеск теллурических токов (ТТ) в проводящих разломах земной коры [Sorokin et al., 2023], плотность которых, в зависимости от проводимости разлома, может достигать  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>, что на 2–3 порядка превышает среднюю плотность теллурических токов в литосфере [Lanzerotti et al., 1986]. При этом длительность импульса ТТ в литосфере может составлять порядка 100 с с длительностью фронта нарастания  $\sim 10$  с.

Следует отметить, что параметры импульсов ТТ, вызываемых СВ, сопоставимы с параметрами импульса тока (плотность  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>, длительность импульса до 10 с), создаваемого в земной коре на глубине 5–10 км искусственными импульсными источниками, подающими

ток в земную кору через заземленный диполь и приводящими к пространственно-временному перераспределению региональной сейсмичности Памира и Северного Тянь-Шаня за счет инициирования слабых землетрясений [Tarasov et al., 2000; Tarasov, Tarasova, 2004; Зейгарник и др., 2022]. В связи с этим сделано предположение, что и СВ класса X также могут инициировать ЗТ в проводящих разломах земной коры, когда они находятся в субкритическом напряженно-деформированном состоянии. На правомерность такого предположения указывают, во-первых, случаи наблюдения импульсов геомагнитного поля перед землетрясением [Scoville et al., 2015], аналогичных полученным численными оценками геомагнитных импульсов, генерируемых рентгеновским излучением СВ, и во-вторых, наблюдением резкого повышения глобальной и региональной сейсмичности (Греция) после солнечной вспышки класса X13.33, произошедшей 06.09.2017 г. [Novikov et al., 2020].

Для дополнительной верификации физической модели и результатов численных исследований [Sorokin et al., 2023] выполнен анализ магнитограмм, зарегистрированных геомагнитными обсерваториями сети INTERMAGNET во время СВ класса X11.83 (10.09.2017 г.), расположенными на различных расстояниях от подсолнечной точки (ПСТ), а также проведен статистический анализ воздействия 50 сильнейших СВ (1997–2023 гг.) как на глобальную сейсмичность, так и на сейсмичность всей освещенной части земного шара и области с радиусом 5000 км вокруг ПСТ, где воздействие СВ будет максимальным, и анализ воздействия СВ класса X и M на афтершоковые зоны двух сильных ЗТ: Суматра-Андаманского ЗТ ( $M = 9.1$ , 26.12.2004 г.) и Дарфилдского ЗТ ( $M = 7.1$ , 04.09.2010 г., Новая Зеландия), в которых постоянно возникают области в субкритическом напряженно-деформированном состоянии, чувствительные к внешним триггерным воздействиям.

#### АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ СВ КЛАССА X

Известно, что СВ вызывают вариации геомагнитного поля, которые представляют собой резкий скачок в течение нескольких минут, затем плавную бухту в течение 30–60 мин и лишь изредка затухающие пульсации [Polanskaya et al., 2023]. В этом случае триггером ЗТ может быть резкий скачок геомагнитного поля, поскольку именно он (его максимальное значение  $dB/dt$ ) вызывает максимальный всплеск теллурических

токов в земной коре, которые по аналогии с искусственным ЭМ воздействием могут инициировать ЗТ. В соответствии с теоретической моделью [Sorokin et al., 2023] рентгеновское излучение СВ поглощается в ионосфере, что приводит к импульсному росту ее проводимости, ионосферных токов и возмущениям геомагнитного поля в присутствии внешнего электрического поля. Предполагается, что максимальные ТТ возбуждаются в литосфере короткопериодными осцилляциями геомагнитного поля. В резонаторе “Земля–ионосфера” излучение СВ с коротким фронтом нарастания его амплитуды генерирует осцилляции геомагнитного поля с периодами от 1 до 100 с в процессе ионизации ионосферы. С учетом того, что рост проводимости ионосферы происходит в освещенной части земного шара, выполнен анализ магнитограмм обсерваторий сети INTERMAGNET [INTERMAGNET Data Viewer], расположенных на ней во время сильной СВ класса X11.83 (10.09.2017 г.). Время начала СВ 15:35 UTC, время пикового излучения 16:06 UTC, время окончания СВ 16:31 UTC. Длительность действия рентгеновского излучения СВ = 56 мин. Координаты ПСТ и зона освещенной части земного шара определялись по дате и времени пикового излучения СВ (16:06 UTC) с использованием солнечного калькулятора [Day and Night World Map]. Координаты обсерваторий, записи которых использованы для анализа, а также расстояние до ПСТ, представлены в табл. 1.

Произведена выборка суточной вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $B_x$  и ее производной  $dB_x/dt$ , которая дает максимальный вклад в генерацию ТТ в литосфере [Thomson et al., 2009], зарегистрированной в различных частях земного шара как освещенной, так и неосвещенной, на различных расстояниях от ПСТ. Выборочные суточные магнитограммы горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $B_x$  и графики ее производной  $dB_x/dt$  для обсерваторий, расположенных на освещенной части земного шара на расстоянии от ПСТ  $R = 1059.897$  км (KOU),  $R = 2354.312$  км (HUA),  $6137.714$  км (BRD),  $9878.412$  км (PPT) и на неосвещенной части на расстоянии  $R = 18166.432$  км (KDU) в течение суток 10.09.2017 г. представлены на рис. 1. Время воздействия СВ показано заштрихованным прямоугольником (время начала СВ 15:35 UTC, окончания – 16:31 UTC, длительность СВ = 56 мин).

Зависимость максимальных значений амплитуды горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $dB_{x_{\max}}$ , а также модуля производной

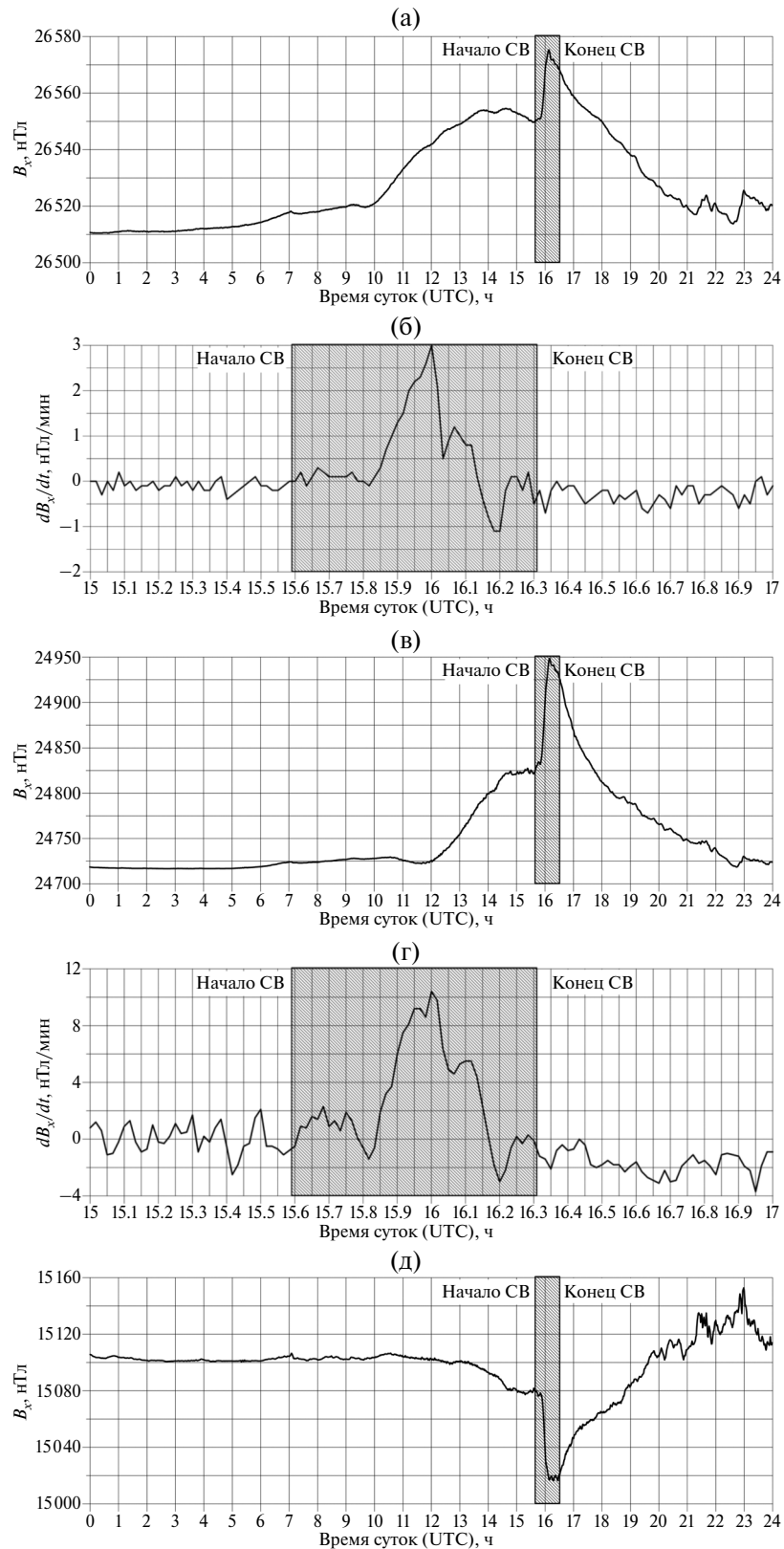
**Таблица 1.** Координаты геомагнитных обсерваторий сети INTERMAGNET с кодами IAGA, записи которых использованы для анализа горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $B_x$  и ее производной  $dB_x/dt$  во время СВ класса X11.88 (2017.09.10 г., максимальный поток излучения в 16:06 UTC, координаты ПСТ для этого времени: широта  $4.683^\circ$ ; долгота  $-62.283^\circ$ ) и расстояние  $R$  от обсерватории до ПСТ

Код IAGA	Широта, град	Долгота, град	Расстояние $R$ до ПСТ, км	$dB_{x_{\max}}$ за время СВ, нТ	$ dB_x/t_{\max} $ за время СВ, нТ/мин
KOU	5.2100	307.2700	1059.897	25.6	3.0
HUA	-12.0500	284.6700	2354.312	127.2	10.4
VSS	-22.4000	316.3500	3629.720	44.9	5.0
FRD	38.2100	282.6330	4028.675	69.90	8.8
STJ	47.5950	307.3230	4859.134	39.10	5.6
TUC	32.1700	249.2700	5883.310	48.2	5.0
BRD	49.8700	260.0261	6137.714	65.3	7.8
KEP	-54.2821	323.5071	6979.411	23.7	3.9
LER	60.1380	358.8170	7995.213	17.50	2.3
HLP	54.6035	18.8107	9010.050	13.70	1.9
PPT	-17.5670	210.4260	9878.412	2.90	0.2
SBA	-77.8500	166.7620	11403.164	10.8	4.9
API	-13.8155	-171.7812	12234.932	0.9	0.2
CSY	-66.2830	110.5330	13142.708	7.0	2.4
MMB	43.9100	144.1900	13997.415	1.7	0.3
BMT	40.3000	116.2000	15010.805	3.4	0.4
GNG	-31.3560	115.7150	17041.820	1.7	0.4
KDU	-12.6900	132.4700	18166.438	0.9	0.2

$|dB_x/t_{\max}|$  за время СВ от расстояния  $R$  от геомагнитной обсерватории до ПСТ, зарегистрированных на обсерваториях табл. 1, представлена на рис. 2.

Анализ магнитограмм  $B_x$ , зарегистрированных в различных частях земного шара как на освещенной, так и на неосвещенной частях, на различных расстояниях от ПСТ показывает, что импульсные вариации геомагнитного поля, предсказанные моделью из работы [Sorokin et al., 2023] во время СВ наблюдаются на освещенной части Земли, где происходит поглощение

рентгеновского излучения СВ в ионосфере. В то же самое время, на границе освещенной части (обсерватория PPT) и на неосвещенной части земного шара (обсерватория KDU) такие пульсации  $B_x$  отсутствуют. На рис. 2 показана тенденция снижения амплитуды пульсаций геомагнитного поля и ее производной с ростом расстояния от ПСТ до геомагнитной обсерватории. Максимальное импульсное изменение  $B_x$  во время СВ составляет 127 нТ, а пульсации  $dB_x/dt$  достигают 10.4 нТ/мин, то есть во время СВ такие пульсации геомагнитного поля будут



**Рис. 1.** Вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $B_x$  (левые панели, все сутки) и ее производной  $dB_x/dt$  (правые панели, интервал времени 15:00–17:00 UTC), зарегистрированные на различных геомагнитных обсерваториях (см. табл. 1) во время СВ класса X11.88, 10.09.2017 г. (а), (б) – KOU,  $R = 1059.897$  км; (в), (г) – HUA,  $R = 2354.312$  км; (д), (е) – BRD,  $R = 6137.714$  км; (ж), (з) – PPT,  $R = 9878.412$ ; (и), (к) – KDU,  $R = 18166.438$  км;  $R$  – расстояние от ПСТ до обсерватории. Длительность воздействия СВ показана заштрихованным прямоугольником (56 мин).

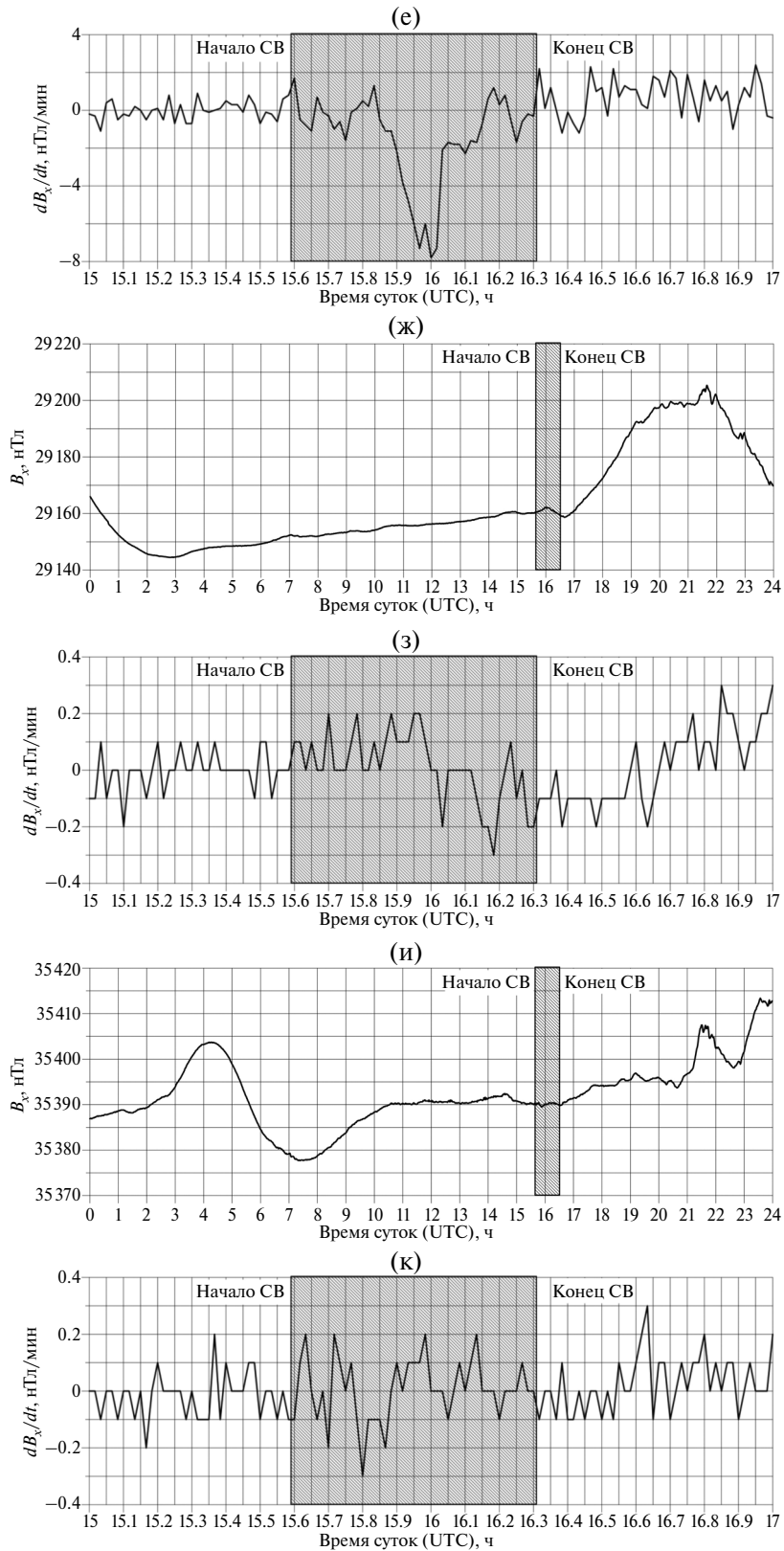
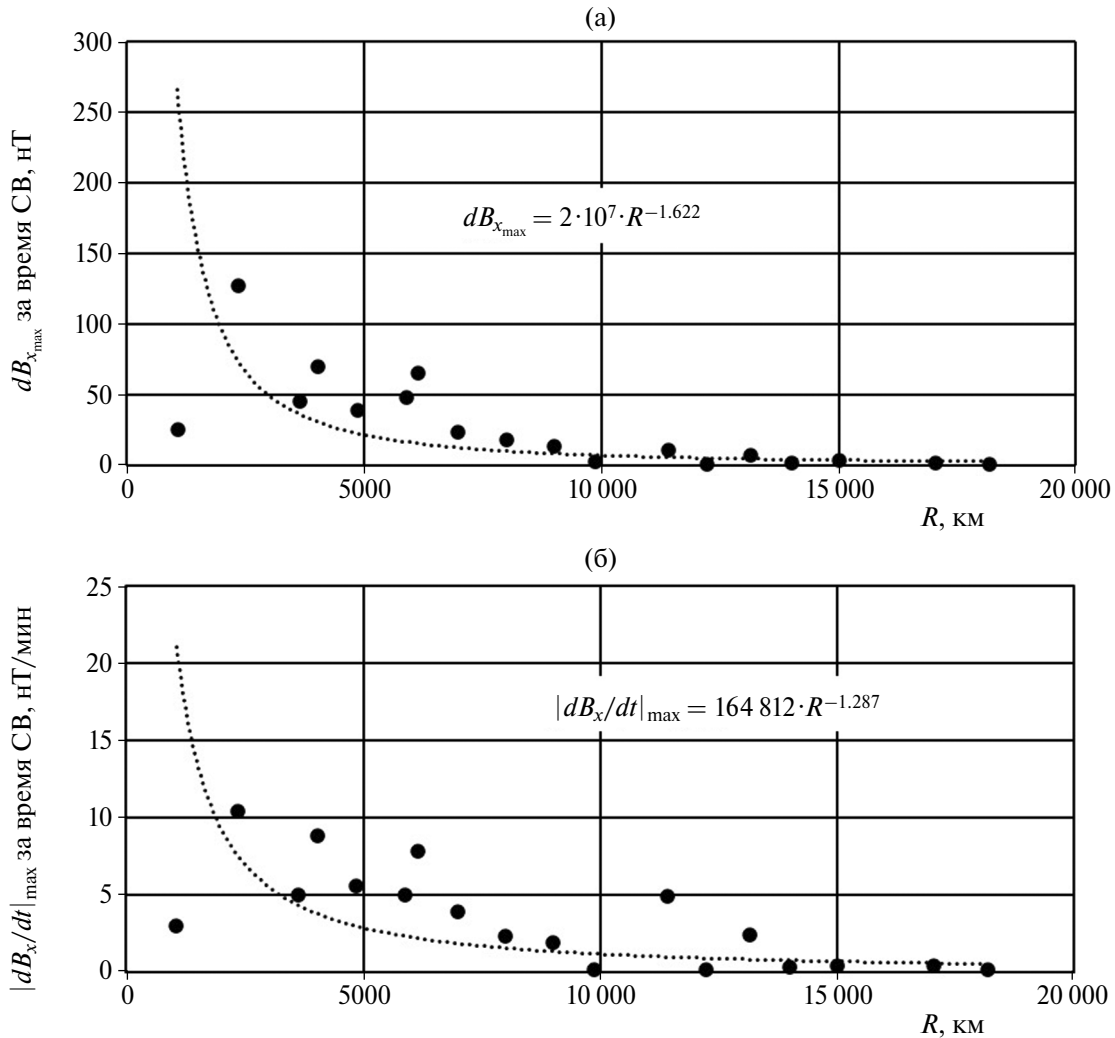


Рис. 1 (окончание).



**Рис. 2.** Зависимости: (а) – максимальных значений амплитуды горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $dB_{x_{\max}}$ ; (б) – модуля производной  $|dB_x/dt|_{\max}$  за время СВ от расстояния  $R$  между геомагнитной обсерваторией и ПСТ СВ класса X11.88 (2017.09.10 г.). Пунктирными кривыми представлены степенные аппроксимации зависимостей  $dB_{x_{\max}}$  и  $|dB_x/dt|_{\max}$  от  $R$ .

генерировать ТТ в литосфере. При этом на неосвещенной части Земли ТТ генерироваться не будут. Но при этом возникает вопрос: могут ли такие импульсные вариации геомагнитного поля во время сильной СВ создавать ТТ в разломах, способные инициировать землетрясения? Необходимо отметить то, что значения производной  $dB/dt$  на уровне 10 нТл/мин значительно ниже  $dB/dt$  для других пульсаций геомагнитного поля типа SSC, суббуревых и P13 пульсаций, амплитуда которых может достигать нескольких сотен нТл/мин. Однако в данной работе не рассматриваются все пульсации геомагнитного поля различной природы, а только те, которые вызваны СВ класса X. Целью данного исследования, начатого в работе [Sorokin et al., 2023], является демонстрация такого подхода к анализу

солнечно-земных связей, когда сначала рассматривается физическая модель таких связей, а затем, на ее основе, делается специальная выборка из рядов наблюдений для последующего, более корректного на взгляд авторов, статистического анализа отклика сейсмичности на электромагнитное воздействие СВ. На следующем этапе исследований планируется анализ данных регистрации геомагнитного поля (пульсаций различной природы) в непосредственной близости от областей подготовки землетрясений, наиболее чувствительных к электромагнитному триггерному воздействию с точки зрения проводимости разломов, их ориентации и степени готовности к динамическому разрыву. Главным результатом проведенного анализа вариаций геомагнитного поля во время СВ является то, что пульсации во

время СВ существуют, регистрируются на освещенной части земного шара и уменьшаются по мере удаления от ПСТ (рис. 1). Следовательно, ТТ, обусловленные этими пульсациями, будут также уменьшаться по мере удаления от ПСТ, что будет определять размер и место выборки из каталога землетрясений для анализа сейсмического отклика на СВ.

### АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ДО И ПОСЛЕ СВ КЛАССА X

С целью ответа на поставленный вопрос о возможности инициирования ЗТ пульсациями геомагнитного поля, генерируемыми СВ, проведен анализ количества ЗТ с использованием временных окон 10 суток до и после СВ класса X методом наложения эпох. Использован каталог 50 сильнейших СВ класса X за период 1997–2023 гг. в диапазоне X3.81–X24.86 [*Real-time data and plots auroral activity*]. Для каждой СВ определены координаты ее ПСТ, зоны вокруг ПСТ с радиусом  $R = 5000, 10\,000$  км (освещенная часть земного шара) и неосвещенная часть ( $R > 10\,000$  км), для которых для каждой СВ сделаны выборки из представительной части каталога ЗТ Геологической службы США (USGS) (ЗТ с  $M \geq 4.5$ ) [Search Earthquake Catalog]. Для рассмотрения возможного влияния мощности СВ на сейсмическую активность анализ проведен как для всех 50 СВ, так и для двух групп класса  $10.0 \geq X \geq 5.0$  (18 СВ) и  $5.0 > X > 3.81$  (26 СВ). При этом СВ класса  $X > 10$  исключены из анализа ввиду их небольшого количества (6), которое может дать значительные статистические погрешности, поскольку ПСТ во время СВ

располагаются на поверхности Земли случайным образом, включая асейсмичные зоны.

Результаты анализа приведены в табл. 2, которые показывают, что в соответствии с физической моделью и численными оценками [Sorokin et al., 2023] отклик сейсмичности на воздействие СВ наблюдается только на освещенной части земного шара ( $R < 10\,000$  км). На неосвещенной части количество ЗТ до и после СВ для всего каталога СВ (строка 1 табл. 2) в течение временного окна 10 суток практически не меняется. Наибольший отклик сейсмичности на СВ ( $\Delta ZT, \%$ ) наблюдается в зоне с радиусом  $R = 5000$  км вокруг ПСТ. С увеличением зоны возможного воздействия СВ на литосферу до границ всей освещенной части ( $R = 10\,000$  км) прирост количества ЗТ после СВ уменьшается до 13.33% по аналогии со снижением амплитуды пульсаций  $B_x$  и  $dB_x/dt$  при удалении от ПСТ (см. рис. 2).

Для СВ класса  $X > 5$  в зоне с радиусом  $R = 5000$  км вокруг ПСТ наблюдается значительный рост количества ЗТ (68.2%), который уменьшается до 24.06% с ростом  $R$  до 10 000 км. Таким образом, подтверждаются выводы, сделанные с использованием физической модели [Sorokin et al., 2023] о возможности инициирования ЗТ сильными СВ класса X. При этом, для проведения в дальнейшем корректного статистического анализа отклика сейсмичности на воздействие СВ необходимо рассматривать только регионы, расположенные вблизи ПСТ. Если проводить анализ отклика глобальной сейсмичности для выбранных 50 сильнейших СВ класса X, то увеличение количества землетрясений для 10-суточного окна после СВ составляет

**Таблица 2.** Количество ЗТ ( $M \geq 4.5$ ): (a) после СВ класса X и (b) до нее в зонах с радиусом 5000 км ( $\Sigma_{R=5000}$ ), 10 000 км ( $\Sigma_{R=10000}$ ) вокруг ПСТ и в неосвещенной части земного шара ( $\Sigma_{\text{non-lit}}$ ), а также вариация количества ЗТ ( $\Delta ZT, \%$ ) в интервале  $\pm 10$  суток от момента СВ для различных групп СВ (1 – для всего каталога 50 сильнейших СВ в период 1997–2023 гг.:  $17.2 \geq X \geq 2.74$ ; для групп 2)  $10.0 \geq X \geq 5.0$  и 3)  $5.0 > X > 2.74$ )

Группа СВ класса X:	$\Sigma_{R=5000}$		$\Sigma_{R=10000}$		$\Sigma_{\text{non-lit}}$	
	a	b	a	b	a	b
1) $17.2 \geq X \geq 2.74$	1667	1209	4507	3977	4157	4163
$\Delta ZT, \%$	37.88		13.33		-0.1	
2) $10.0 \geq X \geq 5.0$	456	767	1330	1546	1640	1590
$\Delta ZT, \%$	68.2		16.24		-3.05	
3) $5.0 > X > 3.81$	640	794	2068	2365	1891	1796
$\Delta ZT, \%$	24.06		14.36		-5.02	



только 6.44%, что может привести к некорректным выводам о слабом влиянии СВ на сейсмичность, либо о ее полном отсутствии.

На рис. 3 представлены гистограммы суточного распределения ЗТ до и после СВ для всего каталога 50 сильнейших СВ класса X. Видно, что как для всей освещенной части земного шара (а), так и для зоны с радиусом 5000 км вокруг ПСТ наблюдается всплеск сейсмической активности с задержкой 7–8 суток после СВ. Аналогичная задержка отклика сейсмической активности (4–8 суток) на искусственные импульсные электромагнитные воздействия на земную кору наблюдалась и в полевых экспериментах при подаче импульсов электрического тока в земную кору на Памире [Tarasov, Tarasova, 2004] и Северном Тянь-Шане [Tarasov et al., 2000].

Очевидно, что для практического использования полученных результатов с точки зрения прогноза инициирования ЗТ при воздействии СВ на зону его подготовки необходимо выделить регионы, наиболее чувствительные к такому воздействию, в первую очередь – области таких разломов, которые находятся в субкритическом

напряженно-деформированном состоянии. Так, в экспериментах на пружинно-блочной модели разлома земной коры было показано, что подвижка борта модельного разлома при подаче импульсов электрического тока в межблоковый контакт возникает только в том случае, когда уровень сдвиговых напряжений в контактной зоне находится на уровне 0.99–0.995 от критического значения, при котором лабораторное “ЗТ” происходит без внешних триггерных воздействий [Novikov et al., 2017].

Уровень напряжений в разломе, где ожидается ЗТ, может быть определен только приблизительно, например, на результатах реконструкции, выполненной структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим для платформенных областей [Rebetsky et al., 2022]. Тем не менее, существуют такие области, в которых постоянно возникают локальные субкритические напряжения. Это афтершоковые зоны сильных землетрясений, где после основного толчка происходит перераспределение напряжений в земной коре и переход ее в новое метастабильное состояние. С целью проверки отклика афтершоковой

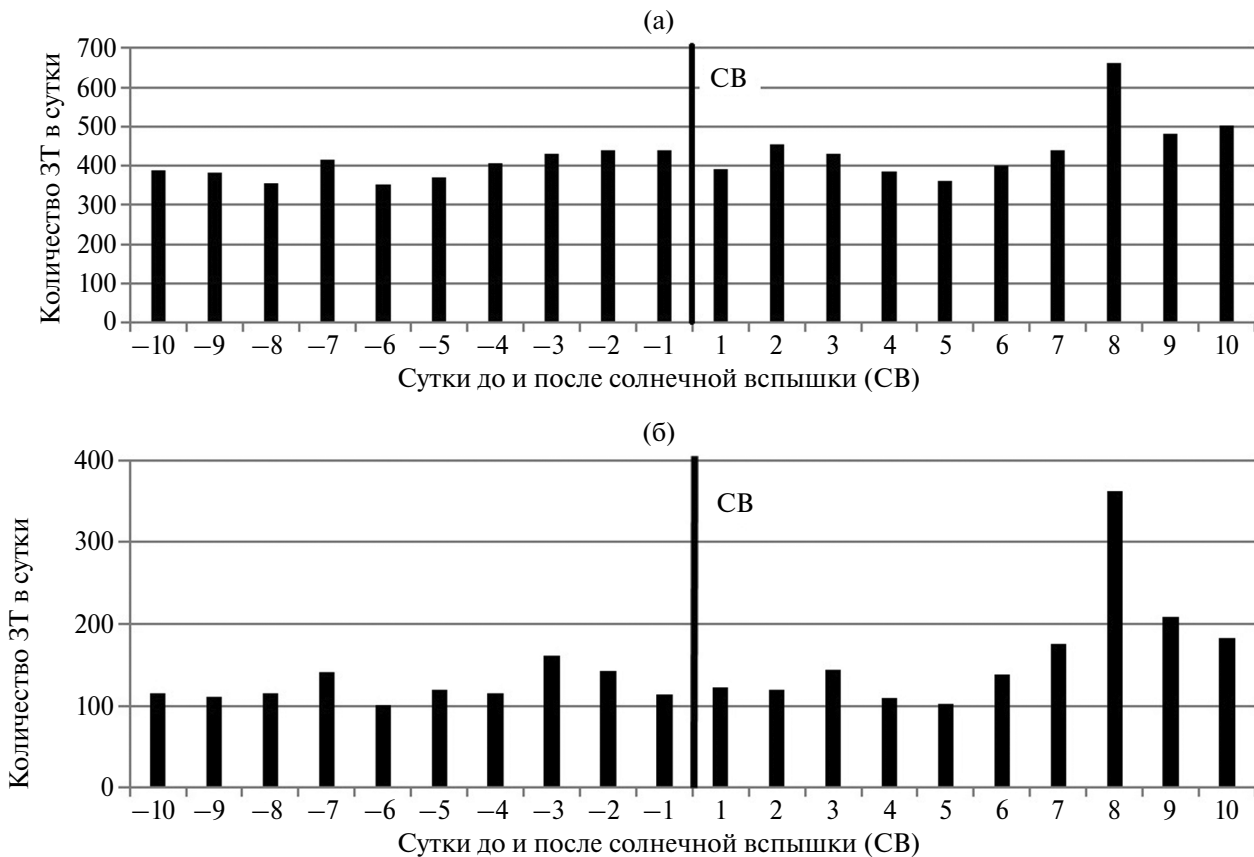


Рис. 3. Сейсмическая активность (количество ЗТ в сутки) до и после СВ (вертикальная линия): (а) – для всей освещенной части земного шара; (б) – для зоны с радиусом 5000 км вокруг ПСТ.

зоны, которая находится в ближней, по отношению к ПСТ, зоне во время сильной СВ, проведен анализ афтершоковой последовательности Суматра-Андаманского ЗТ ( $M = 9.1$ , 26.12.2004 г.) после СВ класса X10.16, которая произошла через 25 суток после основного толчка (20.01.2005 г.).

#### АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВ КЛАССА X НА АФТЕРШОКОВУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ

Сильное Суматра-Андаманское ЗТ с  $M9.1$  произошло у берегов Индонезии 26.12.2004 г. и сопровождалось афтершоковой последовательностью. Через 25 суток 20.01.2005 г. произошла СВ класса X10.16, при этом в момент ее возникновения афтершоковая зона основного толчка была расположена в зоне максимального воздействия СВ (рис. 4) на расстоянии 2717.6 км от эпицентра ЗТ до ПСТ.

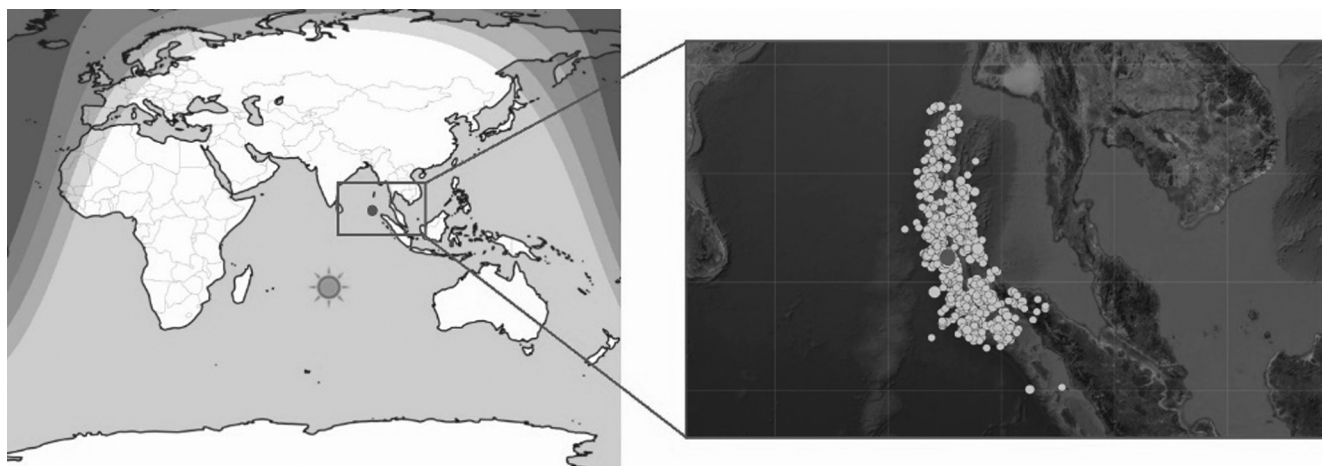
Ионизирующее излучение СВ вызвало пульсацию геомагнитного поля (рис. 5). Суточное распределение количества афтершоков представлено на рис. 6.

Сразу же после основного толчка  $M9.1$  в течение двух суток наблюдается большое количество афтершоков (269 и 202, соответственно) с  $M \geq 2.5$  (каталог USGS), которое уже на третий день снижается до 30. Далее, до момента СВ X10.16 среднесуточное количество афтершоков составляет около 20. После СВ с задержкой 6 суток начинается резкий рост количества афтершоков, который достигает 244 и 240 в течение

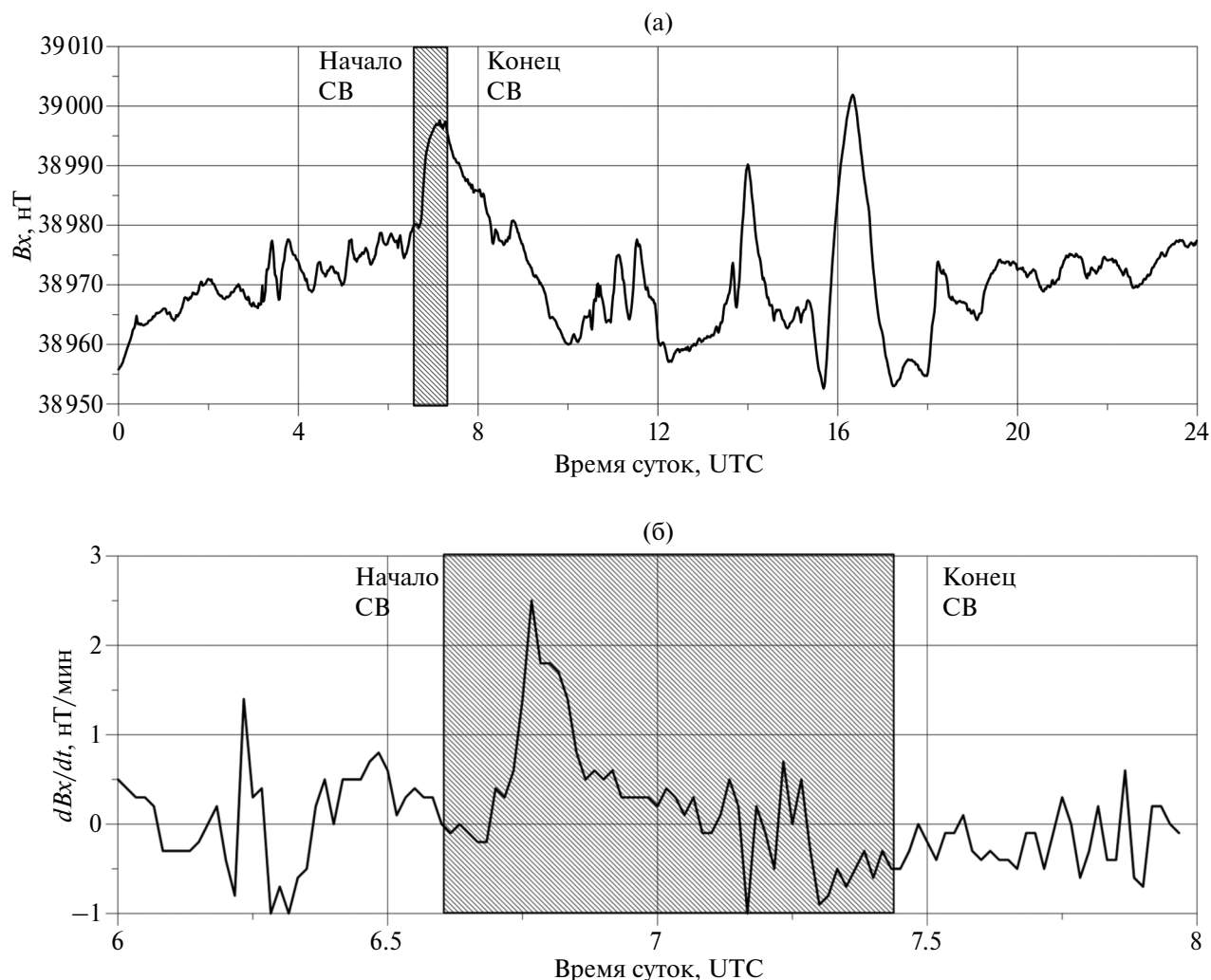
27–28 января 2005 г. и превышает фоновый уровень более чем в 20 раз. Затем происходит спад сейсмической активности до уровня, предшествовавшего СВ. Необходимо отметить, что в указанный период с 26.12.2004 г. по 02.02.2005 г. на земном шаре не было сильных ЗТ с  $M > 7$ , динамическое воздействие которых могло бы привести к наблюдаемому повторному всплеску афтершоковой активности в зоне Суматра-Андаманского ЗТ спустя 30 суток после основного толчка.

Таким образом показано, что в такой области, как афтершоковая зона сильного ЗТ, где вследствие перестройки поля напряжений постоянно возникают и существуют зоны с субкритическим напряженно-деформированным состоянием, СВ класса X, когда ее ПСТ расположена вблизи афтершоковой зоны, может инициировать большое количество сейсмических событий.

Полученные результаты дополнительно подтверждаются возникновением сильных афтершоков после СВ класса X и  $M$  в регионе Новой Зеландии в 2011 г. Сильное ЗТ  $M7.1$  произошло около г. Дарфилд (03.09.2010 г.). После воздействия СВ класса X2.3 (15.02.2011 г.) на афтершоковую зону Дарфилдского ЗТ с задержкой 6 суток произошел сильный афтершок  $M6.3$  (21.02.2011 г.), в результате которого погибло 185 человек. При возникновении этой СВ Новая Зеландия находилась в центральной зоне освещенной части земного шара, а эпицентр афтершока  $M6.3$  был расположен на расстоянии 3853.7 км от ПСТ. По аналогии с другими СВ



**Рис. 4.** Расположение эпицентра Суматра-Андаманского ЗТ (темно-серый кружок, координаты  $3.295^\circ \text{ N}$ ,  $95.982^\circ \text{ E}$ )  $M9.1$ , 26.12.2004 г., и ПСТ (изображение Солнца на левой панели, координаты  $20.083^\circ \text{ S}$ ,  $77.767^\circ \text{ E}$ ) для СВ X10.18, 20.01.2005 г.; справа на врезке показана увеличенная афтершоковая зона основного толчка 26.12.2004 г.; темно-серый кружок – эпицентр ЗТ, расположенный на расстоянии 2717.6 км от ПСТ; светлые серые кружки обозначают эпицентры афтершоков ( $M \geq 2.5$ ).



**Рис. 5.** Вариации геомагнитного поля: (а)  $B_x$  и (б)  $dB_x/dt$ , зарегистрированные на обсерватории РНУ, расположенной на расстоянии 2933.4 км от ПСТ и 2248.2 км от эпицентра ЗТ М9.1 во время СВ класса X10.18, 20.01.2005 г. Длительность СВ (50 мин) обозначена заштрихованным прямоугольником (начало 6:36, максимальный поток излучения 7:01, окончание 7:26 UTC).

класса X на обсерватории EYR (Новая Зеландия) во время данной СВ также была зарегистрирована пульсация горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $B_x$  с амплитудой 20–25 нТ. Следует отметить, что в соответствии с численными результатами, полученными с использованием модели [Sorokin et al., 2023], вектор плотности ТТ в земной коре имеет юго-восточное направление, которое совпадает с направлением простирания разлома Port Hills, на котором произошел афтершок М6.3. При этом плотность ТТ по численным оценкам имеет порядок  $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>, что соответствует плотности тока, генерируемого в литосфере искусственным импульсным источником тока, которая привела к инициированию слабых ЗТ на Северном Тянь-Шане [Зейгарник и др., 2022]. Таким образом, разлом Port

Hills являлся наиболее чувствительным местом к электромагнитному воздействию СВ с точки зрения его напряженно-деформированного состояния (афтершоковая зона Дарфилдского ЗТ), плотности ТТ ( $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>) и ориентации вектора плотности ТТ, совпадающей с направлением простирания разлома, что содействовало дополнительной концентрации тока в разломе. Следует отметить 6-суточную задержку возникновения афтершока М6.3 после СВ, аналогично воздействию СВ на афтершоковую зону Суматра-Андаманского ЗТ М9.1 (задержка 7–8 суток), а также, как уже было указано выше, аналогично отклику сейсмичности при подаче импульсов электрического тока в земную кору на Памире (задержка 6–8 суток) [Tarasov, Tarasova, 2004] и Северном Тянь-Шане [Tarasov et al., 2000].

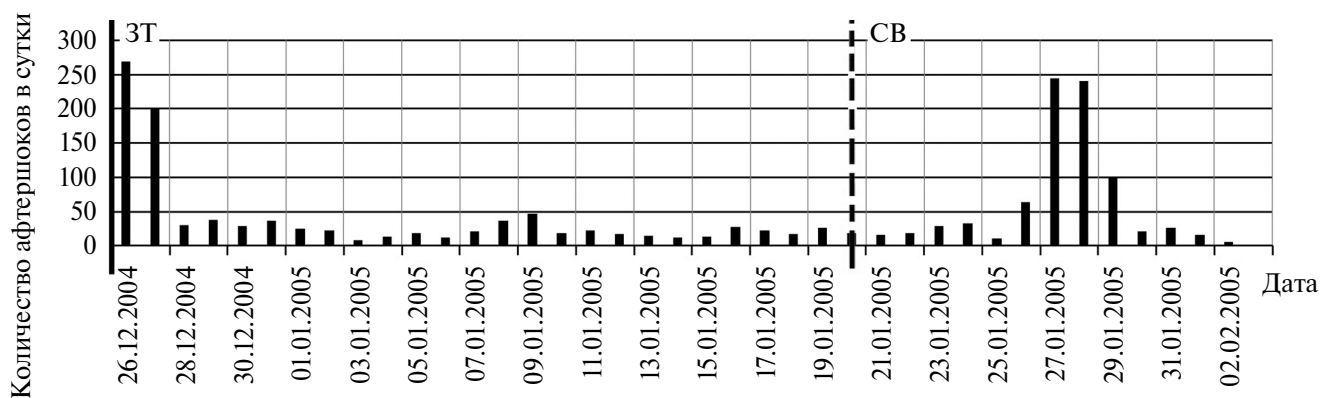


Рис. 6. Суточное распределение количества афтершоков ( $M \geq 2.5$ ) Суматра-Андаманского ЗТ  $M9.1$  с 26.12.2004 г. по 02.02.2005 г. Дата ЗТ обозначена слева черной вертикальной линией. Дата СВ класса X10.18 (20.01.2005 г.) обозначена черной пунктирной вертикальной линией.

Интересным является тот факт, что на том же самом разломе с той же самой задержкой 6 суток 13.06.2011 г. произошли еще два сильных афтершока  $M5.2$  и  $M5.9$  после более слабой СВ класса  $M3.64$  (07.06.2011 г.). Такая длительная задержка отклика сейсмичности на СВ может быть, предположительно, связана с электромагнитным воздействием на миграцию флюидов в очаге ЗТ. По аналогии с импульсным динамическим триггерным воздействием на очаг ЗТ [Brodsky et al., 2003; 2005; Кочарян и др., 2011], когда сейсмические волны приводят к декольматации трещин и изменению режима миграции флюида в зоне подготовки ЗТ, в нашем случае импульс ТТ, энергия которого недостаточна для создания дополнительных механических напряжений [Novikov et al., 2017], способных инициировать ЗТ, также может приводить к декольматации трещин в зоне вокруг сейсмогенного разлома. В результате изменения проницаемости горных пород и увеличения миграции флюида в разлом, приводящей к снижению его механической прочности и фрикционных характеристик, возможно инициирование ЗТ с довольно большой задержкой, которая требуется для диффузии флюида в разлом. Данная гипотеза требует подтверждения лабораторными экспериментами и численными исследованиями.

#### ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Рассмотрим возможность использования полученных результатов для краткосрочного прогноза ЗТ на основе концепции предсказуемости землетрясений, предложенной в работе [Sobolev,

2011]. На основе наблюдений поведения сейсмичности перед сильными землетрясениями, а также лабораторных исследований отклика акустической эмиссии (трещинообразования) из образцов горных пород в субкритическом напряженно-деформированном состоянии при внешних триггерных воздействиях Г.А. Соболевым был предложен следующий алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений на основе триггерных явлений: (а) определение объема неустойчивой зоны (системы неустойчивых зон различного масштаба; (б) мониторинг триггерных эффектов и оценка их воздействия на неустойчивые области; (с) оценка вероятности места, времени и магнитуды землетрясения.

Первый шаг (а) при таком подходе к прогнозу землетрясений может быть выполнен на основе различных методов среднесрочного прогноза ЗТ (см., например, работы [Завьялов, 2006; Dzeboev et al., 2021]). Для случая электромагнитного воздействия на зону подготовки ЗТ в этих регионах необходимо дополнительно выбрать разломы земной коры с учетом их ориентации и электропроводности, в которых может ожидать генерация максимальных ТТ. Очевидно, что максимальные ТТ в разломе будут генерироваться в том случае, когда вектор плотности тока будет параллелен направлению разлома, что способствует концентрации тока в разломе. Согласно модели из работы [Sorokin et al., 2023] векторы плотности тока в северном полушарии в низких и средних широтах ориентированы, в основном, в широтном направлении, а в высоких широтах – в меридиональном направлении. В южном полушарии они ориентированы, как правило, в меридиональном направлении. Такое направление векторов плотности тока определяется горизонтальным распределением

векторов скорости ветра в ионосфере, создающего динамо-поле. Это распределение имеет сезонные и суточные вариации, модель которых используется в программе расчета векторов плотности тока [Sorokin et al., 2023; Новиков и др., 2023], и оно важно при выборе регионов и разломов, где будет анализироваться возможный отклик сейсмической активности на СВ.

Другим важным параметром при выборе разломов земной коры, чувствительных к сильным вариациям космической погоды, является их удельное электрическое сопротивление, которое обычно определяется методом магнитотеллурического (МТ) зондирования [Mackie et al., 1997]. Результаты полевых исследований показали, что разлом Сан-Андреас (Калифорния, США) [Unsworth et al., 1997] и другие основные разломы, например, разлом Alpine в Новой Зеландии [Ingham, Brown, 1998] и разлом Fraser River в Британской Колумбии, Канада [Jones et al., 1992] имеют проводящие зоны с удельным сопротивлением от 0.8 до 50 Ом·м. В то же время, некоторые крупные разломы демонстрируют наличие как проводящих, так и резистивных зон. Например, МТ-зондирование разлома Tintina в Северных Кордильерах [Ledo et al., 2002] показало, что разлом связан с резистивной зоной (>400 Ом·м) шириной 20 км на глубинах свыше 5 км. Разлом Denali на Аляске также имеет относительно резистивную структуру в верхних слоях земной коры [Stanley et al., 1990], а разлом Сан-Андреас в районе Carrizo Plain имеет резистивную зону в средне-глубинной области земной коры [Mackie et al., 1997]. Удельное сопротивление этих разломов варьируется в диапазоне ~250–10 000 Ом·м, следовательно, генерация импульсов ТТ вследствие сильных вариаций параметров космической погоды, достаточных для инициирования землетрясения, маловероятна или невозможна.

С учетом полученных численных оценок [Sorokin et al., 2023], по нашему мнению, корректный статистический корреляционный анализ влияния солнечной активности на сейсмичность Земли для выявления пороговых значений параметров такого воздействия, приводящих к инициированию ЗТ, должен, во-первых, основываться на физической модели механизма солнечно-земных связей, а во-вторых, в нашем случае для рассматриваемой конкретной модели электромагнитного инициирования ЗТ, выполняться следующим образом:

а) определение неустойчивой области (секции разлома земной коры), где ожидаются сильные землетрясения на основе существующих

методов выбора сейсмоопасных регионов (см., например, работы [Завьялов, 2006; Dzeboev et al., 2021]);

б) выбор разломов земной коры в регионах, определенных на шаге (а), наиболее чувствительных к электромагнитному воздействию с точки зрения их ориентации, близкой к направлению вектора плотности ТТ, а также их электропроводности;

с) выборка из региональных сейсмических каталогов тех землетрясений, которые произошли на разломах, определенных на шаге (б);

д) корреляционный анализ времени возникновения ЗТ и вариаций параметров космической погоды для определения времени задержки инициирования землетрясения и пороговых значений параметров космической погоды, вызывающих триггерный эффект в зоне подготовки землетрясения.

Таким образом, при наличии данных по электрическому сопротивлению разломов в зоне подготовки сильного ЗТ и степени готовности разлома земной коры к динамическому разрыву, эффект триггерного воздействия сильных СВ (класс X) можно использовать в качестве дополнительной прогностической информации в методах краткосрочного прогноза землетрясений наряду с другими предвестниками сильных ЗТ. Обнаруженная задержка отклика афтершоковой последовательности сильного ЗТ в Новой Зеландии на воздействие на нее СВ класса X может быть использована для определения временного интервала повышенной опасности инициирования сильных афтершоков во время спасательных работ после основного толчка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для дополнительной верификации результатов численных исследований с использованием физической модели [Sorokin et al., 2023] выполнен анализ магнитограмм, зарегистрированных на геомагнитных обсерваториях сети INTERMAGNET, а также проведен статистический анализ воздействия 50 сильнейших СВ как на глобальную сейсмичность, так и на сейсмичность всей освещенной части земного шара и области с радиусом 5000 км вокруг ПСТ, где воздействие СВ будет максимальным.

В результате выполненного анализа сейсмической активности во время СВ класса X методом наложения эпох для временных окон 10 суток до и после СВ показан рост количества ЗТ вокруг ПСТ после СВ до 38%. Кроме того,

обнаружена максимальная чувствительность афтершоковой зоны Суматра-Андаманского ЗТ (M9.1, 26.12.2004 г., Индонезия) к воздействию сильной СВ (X7.2, 20.01.2005 г.), в результате воздействия которой количество афтершоков ( $M \geq 2.5$ ) возросло более чем в 20 раз с задержкой 7 суток после СВ. Аналогичный результат был получен для афтершоковой зоны Дарфилдского ЗТ (M7.1, 04.09.2010 г.), расположенной в зоне воздействия СВ X2.3 (15.02.2011 г.), после которой с задержкой 6 суток произошел сильный афтершок M6.3 (21.02.2011 г.).

Полученные результаты демонстрируют тот факт, что корректный статистический анализ солнечно-земных связей с точки зрения влияния солнечной активности на сейсмичность Земли необходимо проводить на основе какой-либо гипотезы о физическом механизме воздействия Солнца на деформационные процессы в земной коре для зон, наиболее чувствительных к такому воздействию. В данном случае, рассмотренный механизм электромагнитного воздействия СВ на зону подготовки ЗТ показал свою эффективность, когда было продемонстрировано, что сейсмическая активность в течение 10 суток после СВ возрастает примерно на 40% в области, близкой к ПСТ СВ, в то время как отклик сейсмичности на СВ на неосвещенной части земного шара не наблюдается.

Обнаруженные пульсации геомагнитного поля на освещенной части земного шара во время сильных СВ класса X, а также отклик сейсмичности на воздействие СВ, особенно в афтершоковой зоне сильных ЗТ, подтверждают гипотезу и физическую модель инициирования ЗТ ионизирующим излучением СВ, изложенные в работах [Sorokin et al., 2019; 2023; Novikov et al., 2020; Новиков и др., 2023]. На основе концепции прогнозируемости ЗТ на основе триггерных эффектов [Sobolev, 2011] полученные результаты, по нашему мнению, могут быть использованы в качестве дополнительной прогностической информации в методах краткосрочного прогноза ЗТ при наличии данных по электрическому сопротивлению разломов в зоне подготовки сильного ЗТ и воздействия СВ, а также по степени готовности разлома к динамическому разрыву. Очевидно, что такой подход на основе электромагнитных триггерных явлений может применяться только для сейсмоопасных регионов с проводящими разломами земной коры, ориентация которых примерно совпадает с направлением вектора плотности ТТ, возбуждаемых СВ. При этом рассматриваемая зона ожидаемого ЗТ должна располагаться на освещенной части

земного шара как можно ближе к ПСТ СВ, где наблюдаются максимальные пульсации геомагнитного поля, вызванные СВ.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (Государственные задания ОИВТ РАН № 075-00270-24-00, ИДГ РАН № 122032900167-1, ИЗМИРАН № 1021060808637-6-1.3.8).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А.* О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // *Физика Земли*. 2002. № 4. С. 3–15.
- Зейгарник В.А., Богомолов Л.И., Новиков В.А.* Электромагнитное инициирование землетрясений: полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и физические механизмы (Обзор) // *Физика Земли*. 2022. № 1. С. 35–66. <https://doi.org/10.31857/S0002333722010100>
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П.* О связи сейсмичности с магнитными бурями // *Физика Земли*. 2001. № 11. С. 62–72.
- Соболев Г.А.* Влияние больших магнитных бурь на возникновение больших землетрясений // *Физика Земли*. 2021. № 1. С. 24–40.
- Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М.* Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // *Физика Земли*. № 12. 2011. С. 50–62.
- Новиков В.А., Сорокин В.М., Яценко А.К., Мушкарев Г.Ю.* Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки // *Динамические процессы в геосферах*. 2023. Т. 15. № 1. С. 23–44. [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_1\\_23](https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_23)
- Akhoondzadeh M., De Santis A.* Is the Apparent Correlation between Solar-Geomagnetic Activity and Occurrence of Powerful Earthquakes a Casual Artifact? // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 1131. <https://doi.org/10.3390/atmos13071131>
- Anagnostopoulos G., Spyroglou I., Rigas A., Preka-Papadema P., Mavromichalaki H., Kiosses I.* The sun as a significant agent provoking earthquakes // *The European Physical Journal Special Topics*. 2021. V. 230. P. 287–333. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000266-2>
- Day and Night World Map. Интернет-ресурс: <https://www.timeanddate.com/worldclock/sunearth.html> (доступ 18.04.2024).
- Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Agayan S.M., Belov I.O., Karapetyan J.K., Dzeranov B.V., Barykina Y.V.* System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition //

- Applied Sciences. 2021. № 11. P. 7972. <https://doi.org/10.3390/app11177972>
- Brodsky E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M.* A mechanism for sustained ground water pressure changes induced by distant earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2003. № 108. P. 2390–2400.
- Brodsky E.E., Prejean S.G.* New constraints on mechanisms of remotely triggered seismicity at Long Valley Caldera // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. B04302. <https://doi.org/10.1029/2004JB003211>
- Ingham M., Brown C.* A magnetotelluric study of the Alpine Fault, New Zealand // *Geophysical Journal International*. 1998. № 2. P. 542–552. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00659.x>
- INTERMAGNET Data Viewer. Интернет-ресурс: [https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\\_V1/GINForms2](https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2) (доступ 18.04.2024).
- Jones A.G., Kurtz R.D., Boerner D.E., Craven J.A., McNeice G.W., Gough D.I., DeLaurier J.M., Ellis R.G.* Electromagnetic constraints on strike-slip fault geometry – The Fraser River fault system // *Geology*. 1992. № 20. P. 561–564. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0561:ECOSSF>2.3.CO2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0561:ECOSSF>2.3.CO2)
- Lanzerotti L.J., Gregori G.P.* Telluric currents: The natural environment and interaction with man-made systems. The Earth's Electrical Environment. Washington D.C.: The National Academic Press. 1986. P. 232–257.
- Ledo J., Jones A.G., Ferguson I.J.* Electromagnetic images of a strike-slip fault: The Tintina fault-Northern Canadian // *Geophysical Research Letters*. 2002. № 29. P. 1225. <https://doi.org/10.1029/2001GL013408>
- Love J.J., Thomas J.N.* Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // *Geophysical Research Letters*. 2013. № 40. P. 1165–1170. <https://doi.org/10.1002/grl.50211>
- Mackie R.L., Livelybrooks D.W., Madden T.R., Larsen J.C.* A magnetotelluric investigation of the San Andreas Fault at Carrizo Plain, California // *Geophysical Research Letters*. 1997. № 24. P. 1847–1850. <https://doi.org/10.1029/97GL01604>
- Novikov V.A., Okunev V.I., Klyuchkin V.N., Liu J., Ruzhin Yu.Ya., Shen X.* Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models // *Earthquake Science*. 2017. V. 30. № 4. P. 167–172. DOI: 10.1007/s11589-017-0181-8
- Novikov V., Ruzhin Yu., Sorokin V., Yaschenko A.* Space weather and earthquakes: possible triggering of seismic activity by strong solar flares // *Annals of Geophysics*. 2020. № 63(5). P. A554. <https://doi.org/10.4401/ag-7975>
- Polyanskaya E.A., Solovieva M.S., Pilipenko V.A., Korkina G.M.* Monitoring of the Solar Flare Impact on the Ionosphere with VLF Radio Sounding and Magnetometers / Kosterov A., Lyskova E., Mironova I., Apatenkov S., Baranov S. (eds.). Problems of Geocosmos-2022. ICS 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2023. P. 361–373. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40728-4\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40728-4_27)
- Real-time data and plots auroral activity. Интернет-ресурс: <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/top-50-solar-flares.html> (доступ 11.03.2024).
- Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V.* Algorithm for calculating neotectonic stresses in platform areas by the structural-geomorphological method // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. V. 13. № 1. P. 0577. DOI:10.5800/GT-2022-13-1-0577
- Scoville J., Heraud J., Freund F.* Pre-earthquake magnetic pulses // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. № 15. P. 1873–1880. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1873-2015>
- Search Earthquake Catalog. Интернет-ресурс: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (доступ 18.04.2024).
- Sobolev G.A.* Seismicity dynamics and earthquake predictability // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2011. № 11. P. 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>
- Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Novikov V.A.* A possible mechanism of stimulation of seismic activity by ionizing radiation of solar flares // *Earthquake Sciences*. 2019. V. 32. № 1. P. 26–34. <https://doi.org/10.29382/eqs-2019-0026-3>
- Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Mushkarev G.Yu., Novikov V.A.* Telluric Currents Generated by Solar Flare Radiation: Physical Model and Numerical Estimations // *Atmosphere*. 2023. V. 14. № 3. P. 458. <https://doi.org/10.3390/atmos14030458>
- Stanley W.D., Labson V.F., Nokleberg W.J., Csejtey B., Fisher M.A.* The Denali fault system and Alaska Range of Alaska: Evidence for underplated Mesozoic flysch from magnetotelluric surveys // *Bulletin of Geological Society of America*. 1990. № 102. P. 160–173. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102<0160:TDFSA>2.3.CO2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102<0160:TDFSA>2.3.CO2)
- Tarasov N.T., Tarasova N.V.* Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses // *Annals of Geophysics*. 2004. V. 47. № 1. P. 199–212. <https://doi.org/10.4401/ag-3272>
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A.* The Effect of High Energy Electromagnetic Pulses on Seismicity in Central Asia and Kazakhstan // *Volcanology and Seismology*. 2000. V. 21. P. 627–639.
- Thomson A.W.P., McKay A.J., Viljanen A.* A Review of Progress in Modelling of Induced Geoelectric and Geomagnetic Fields with Special Regard to Induced Currents // *Acta Geophysica*. 2009. V. 57. № 1. P. 209–219. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0061-7>
- Unsworth M.J., Malin P.E., Egbert G.D., Booker J.R.* Internal Structure of the San Andreas Fault Zone at Parkfield, California // *Geology*. 1997. № 25. P. 359–362. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0359:ISOTSA>2.3.CO2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0359:ISOTSA>2.3.CO2)

## Electromagnetic Trigger Effects in the Ionosphere—Atmosphere—Lithosphere System and Their Possible Use for Short-Term Earthquake Forecasting

V. A. Novikov<sup>a,b,\*</sup> and V. M. Sorokin<sup>c,\*\*</sup>

<sup>a</sup>Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

<sup>b</sup>Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

<sup>c</sup>Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, 142191 Russia

\*e-mail: novikov@ihed.ras.ru

\*\*e-mail: sova@izmiran.ru

Received February 15, 2024

revised March 11, 2024

accepted April 27, 2024

**Abstract** – Previously conducted numerical studies of the influence of class X solar flares on seismic activity have shown that the absorption of X-ray radiation from a solar flare in the ionosphere can cause pulsations of the geomagnetic field up to 100 nT and the corresponding generation of telluric currents in faults in the Earth's crust with a density of up to  $10^{-6}$  A/m<sup>2</sup>, which is comparable to the current density created in the Earth's crust by artificial pulse sources and leading to the initiation of weak earthquakes in the Pamirs and Northern Tien Shan. To verify these numerical results, an analysis was conducted of the possible impact of the 50 strongest class X flares (1997–2023) on both global seismic activity and earthquake-preparation zones located only on the illuminated part of the globe. The method of superimposing epochs has established an increase in number of earthquakes  $M \geq 4.5$  within 10 days after a solar flare, especially in the area with a radius of 5000 km around the subsolar point (up to 68% for flare class >X5), compared to the same period before it. Analysis of aftershock activity of the strong Sumatra–Andaman earthquake ( $M = 9.1$ , December 26, 2004) showed that the number of aftershocks with magnitude  $M \geq 2.5$  increased more than 17 times after the X10.1 class solar flare (January 20, 2005) with a delay of 7–8 days. In addition, it has been shown that solar flares of class X2.3 and M3.64, which occurred after the Darfield earthquake ( $M = 7.1$ , September 3, 2010, New Zealand), in the area of subsolar points of which the aftershock zone was located, probably caused three strong aftershocks ( $M6.3$ ,  $M5.2$ , and  $M5.9$ ) with the same delay of 6 days on the Port Hills fault, which is the most sensitive to external electromagnetic influences in terms of its electrical conductivity and orientation. Taking into account the concept of earthquake forecasting based on trigger effects proposed by G.A. Sobolev, the possibility is discussed of using the obtained results for short-term forecasting as additional information along with known precursors.

**Keywords:** solar flare, X-ray radiation, ionosphere, telluric currents, electromagnetic initiation of earthquakes, short-term forecast