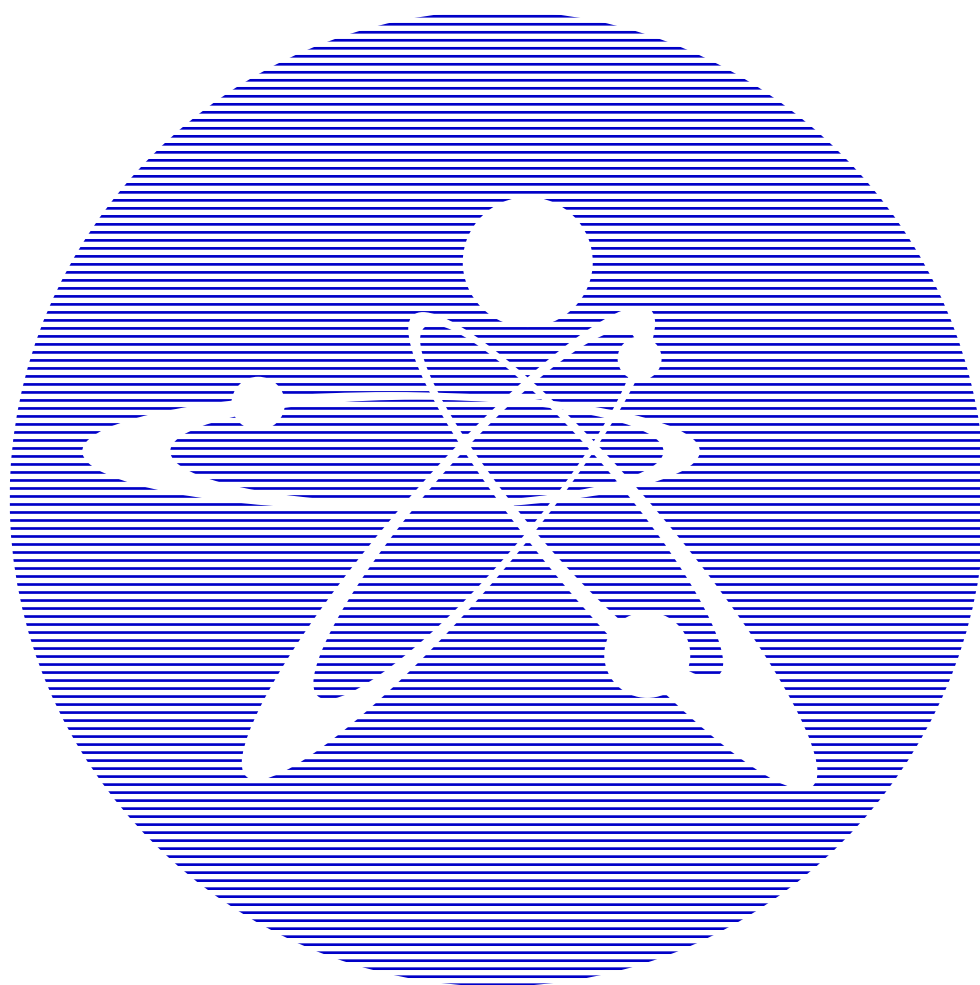


2018
ВЫПУСК 2

ISSN 1729-7516

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ЖУРНАЛ
ВЕСТНИК



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 2(74), ИЮНЬ 2018

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н., профессор БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора,
д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., доктор инженерии ВИЕЛЕБА В.К. (Польша),
к.ф.-м.н. ВИТЮК В.А., к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОВЕВ А.В. (Россия), д.ф.-м.н. МАКСИМКИН О.П.,
д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.,
д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., профессор ФУДЖИ-Е (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

2(74) ШЫҒАРЫМ, МАУСЫМ, 2018 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 2(74), JUNE 2018

Периодический научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК», решением Комитета по контролю в сфере образования и науки включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов:

- по физико-математическим наукам,
- по специальности 25.00.00 – науки о Земле.

СОДЕРЖАНИЕ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ И ПРОДУКТОВ ОРГАНИЗАЦИИ ДОГОВОРА О ВСЕОБЪЕМЛЮЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В СЕЙСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ РОССИИ В ОПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ	
Маловичко А.А., Старовойт О.Е., Коломиец М.В., Габсатарова И.П., Рыжикова М.И.	5
LOCATION AND IDENTIFICATION OF SEISMIC EVENTS AROUND NORTH KOREAN NUCLEAR TEST SITE FOLLOWING THE 3 SEPTEMBER 2017 UNDERGROUND NUCLEAR TEST	
W.-Y. Kim, D. Schaff, P.G. Richards.....	11
РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ И НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ В 2016-2017 ГГ. РОССИЙСКИМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ	
Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Коломиец М.В.	20
СИСТЕМЫ ГРУППИРОВАНИЯ «ОЖЕРЕЛЬЕ» ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «БОРОВОЕ»	
Ан В.А., Каазик П.Б., Непеина К.С., Челюбеева Т.В.	27
ОЦЕНКА ТРЕНДА ВРЕМЕНИ ПРОБЕГА ВОЛНЫ РККР_{DF} НА ТРАССЕ СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН – СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ «НОВОЛАЗАРЕВСКАЯ» В АНТАРКТИДЕ	
Ан В.А., Каазик П.Б., Непеина К.С.	32
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА ГЕОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»	
Рябова С.А.	36
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ СЕЙСМОВИБРАТОРОВ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА–АТМОСФЕРА	
Хайретдинов М.С., Ковалевский В.В., Воскобойникова Г.М., Седухина Г.Ф., Якименко А.А.	44
РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОТОЧНОЙ СВЕРТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПЛИС	
Хайретдинов М.С., Остапкевич М.Б., Минахудинов Р.Ф.	49
ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ МАГНИТУДОЙ M=6,4, ПРОИЗОШЕДШЕГО 25 НОЯБРЯ 2016 ГОДА	
Мукашева С.Н., Соколова О.И., Малимбаев А.М.	54
ИНТЕГРАЛЬНАЯ БАЗА ДАННЫХ О МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СССР	
Васильев А.П., Горин Н.В., Дубасов Ю.В., Ильичев В.А., Касаткин В.В.	58
АЛГОРИТМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ 2D–3D СРЕД В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ЗОН ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ	
Хайретдинов М.С., Караваев Д.А., Якименко А.А.	64
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ЛИТОСФЕРЫ ДО ИОНОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	
Салихов Н.М., Пак Г.Д.	69
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА	
Горбунова Э.М.	78

УДК 550.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА ГЕОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»

Рябова С.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер
Российской академии наук, Москва, Россия*

Исследуется отклик сейсмического фона на импульсные геомагнитные вариации для условий среднеширотной Геофизической обсерватории «Михнево» Института динамики геосфер Российской академии наук. При импульсных вариациях магнитного поля SSC- и SI-типов в большинстве случаев наблюдаются повышенные вариации сейсмического фона в частотном диапазоне 0,01–0,1 Гц (в отдельных случаях 0,001–0,1 Гц). Методами статобработки установлено, что именно возмущение геомагнитного поля вызывает (с некоторым запаздыванием) изменение микросейсмического фона. Выявлена значимая корреляция и получена количественная оценка зависимости между амплитудой геомагнитного импульса и амплитудой вызванных вариаций сейсмического фона. После геомагнитного импульса с небольшой задержкой по времени в поведении модуля магнитного течения наблюдаются «скачкообразные» изменения величины наведенных электрических токов.

ВВЕДЕНИЕ

Цепочка Солнце – межпланетное пространство – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – тектосфера Земли представляет собой сложную открытую динамическую нелинейную систему, в которой все процессы взаимосвязаны. Можно ожидать существование связи между солнечной активностью, возмущениями магнитного поля Земли и тектоническими процессами Земли. Интерес к этой проблеме вызван тем, что подобные исследования позволят получить дополнительную информацию о периодах повышения сейсмической опасности, изучить триггерное воздействие на сейсмичность факторов разной физической природы и более полно понять закономерности солнечно-земных связей.

Многочисленные исследования продемонстрировали наличие связи между солнечной активностью и сейсмичностью Земли. В ряде работ на основе анализа эмпирических данных, в том числе и с привлечением статистических методов, найдено неслучайное соотношение между числом солнечных пятен и возникновением землетрясений. Так установлено, что в период 11-летнего цикла солнечной активности наиболее высокая сейсмическая активность Земли соответствует эпохам максимума и минимума этого цикла, когда уровень солнечной активности быстро и резко меняется [1–5]. Однако опубликованные результаты нередко носят противоречивый характер. В ряде публикаций показано, что в периоды повышения солнечной активности происходит уменьшение сейсмичности (числа землетрясений) Земли [6–13]. В других работах [14–16], напротив, обнаружено повышение сейсмичности при максимуме и фазе роста солнечной активности. Проведенный в [17] статистический анализ не смог ни подтвердить, ни опровергнуть гипотезу о связи глобального числа сильных землетрясений ($M \geq 7,5$) и числа групп солнечных пятен.

Еще один вопрос, связанный с влиянием на сейсмичность Земли солнечно-земных процессов, а именно геоэффективных событий, сопровождающихся магнитными бурями с внезапным началом (SSC), неоднократно рассматривался в литературе [18–23]. В целом проблема представляется сложной, поскольку эффект по всей видимости носит мерцающий характер, как это отмечается в [21–22], а отдельные исследования [24–25] связь между магнитными бурями и сейсмичностью вообще не выявили. Высказывается мнение [26–29], что помимо сильных возмущений, в виде магнитных бурь, на развитие сейсмических событий может оказать влияние спокойная солнечно-суточная (Sq -) вариация магнитного поля Земли.

В меньшей степени уделяется внимание вопросу влияния магнитных бурь на микросейсмический фон. Выполненные исследования [30–32] продемонстрировали резкое возрастание амплитуды и среднеквадратичного отклонения микросейсмического фона после магнитной бури, причем эффект зависит от величины и скорости изменения магнитного поля. Результаты работы [33] не подтвердили возможное влияние слабых геомагнитных вариаций на фоновую сейсмичность. Следует отметить, что проведение экспериментов искусственного облучения локальных областей земной коры мощными электромагнитными импульсами показало заметную активизацию сейсмичности после облучения [34–36], причем эффект схож с изменением сейсмичности во время магнитных бурь [37–38]. Подтверждением результатов натурных экспериментов служат лабораторные эксперименты [39–41], в которых выявлено повышение уровня акустической эмиссии различных образцов горных пород под нагрузкой после их облучения электромагнитными импульсами.

На сегодняшний день дискуссионным остается вопрос о физическом механизме влияния солнечной и геомагнитной активности на вариации сейсмичес-

ких колебаний. В качестве основных возможных механизмов предлагаются следующие: изменение величины и конфигурации теллурических токов [1, 42]; изменение формы и циркуляции атмосферы [43–45]; обратный пьезоэлектрический эффект [46–47]; действие пондеромоторных сил [48]; термическое расширение при нагреве среды [38]; преобразование электромагнитной энергии в колебательную энергию электропроводящих флюидов в поровых каналах [31]. Теоретические и лабораторные исследования показали, что наличие флюидов играет важную роль в процессе преобразования электромагнитной энергии в упругую энергию [49].

Таким образом, в настоящее время, нет однозначного представления о связи солнечно-земных процессов и геодинамических процессов, и наименее проработанным является вопрос о влиянии сильных магнитных возмущений на параметры микросейсмического фона. В настоящей работе исследуется отклик микросейсмического фона на импульсные геомагнитные вариации для условий среднеширотной Геофизической обсерватории «Михнево» Института динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы данные синхронных инструментальных наблюдений за сейсмическими колебаниями и вариациями геомагнитного поля на территории Геофизической обсерватории «Михнево». Обсерватория с географическими координатами 54,959° с. ш., 37,766° в. д. расположена вдали от крупных источников электромагнитных помех, в южной части Московской синеклизы в зоне сочленения трех мегаблоков Восточно-Европейской платформы — Сарматского, Фенноскандского и Волго-Уральского, в зоне динамического влияния глубинной водонасыщенной тектонической структуры. Эта структура, относящаяся к Приокскому участку Нелидово-Рязанской шовной зоны, распространяется в

северо-восточном направлении и выходит в окрестности обсерватории [50].

Измерения геомагнитных вариаций выполнялись в специально оборудованном павильоне с использованием феррозондового магнитометра LEMI-018i, регистрация сейсмических колебаний проводилась сейсмоприемниками STS-2 и СМ-3КВ, сбор и накопление данных осуществлялись с помощью программируемых регистраторов RefTek.

С целью повышения достоверности результатов выполнялась проверка возможного непосредственного влияния геомагнитных вариаций на электродинамическую часть сейсмоприемников (рабочая катушка индуктивности сейсмоприемника может реагировать на магнитное поле, что, в свою очередь, может привести к искажению получаемой информации). Для того чтобы убедиться, что сейсмоприемник регистрирует сейсмические колебания, а не наводку за счет вариаций магнитного поля, был выполнен специальный эксперимент по ранее разработанной методике [51]. В качестве источников слабого магнитного поля (100–1000 нТл) использовались катушки с током: одна диаметром 8,1 см, высотой 16,5 см (число витков 192); другая диаметром 5,5 см, высотой 9,55 см (число витков 75). Для создания мощных магнитных полей (с напряженностью до 10 Э) была изготовлена кольцевая рамка диаметром 22,5 см с числом витков 500, сопротивлением 16,9 Ом и индуктивностью ~80 мГн. Регистрация слабого магнитного поля осуществлялась датчиком из аморфного ферромагнитного материала [52]; регистрация сильного магнитного поля – с использованием измерительной катушки – наружный диаметр 3,6 см, внутренний диаметр 2 см, высота 1,65 см, число витков 4500 (медный провод ПЭВ-2 диаметром 0,013 см), сопротивление 500 Ом, чувствительность 100 мкВ/нТл). Пример сборки мощного источника магнитного поля и проверяемых магнитометров приведен на рисунке 1. Катушки и кольцевая рамка по очереди подключались к импульсному источнику, подробно описанному в [51].

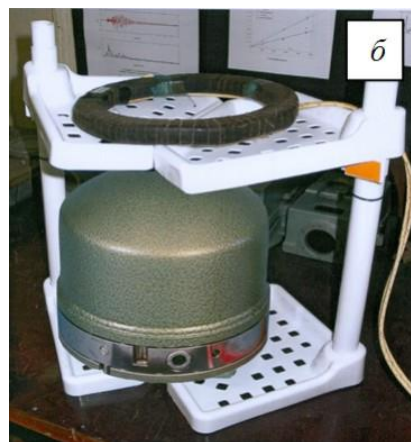


Рисунок 1. Общий вид лабораторного оборудования эксперимента по проверке воздействия магнитного поля на сейсмометры: (а) – СМ-3КВ; (б) – STS-2

В результате проведенных измерений установлено отсутствие наводки на сейсмоприемники при магнитных вариациях в широком диапазоне амплитуд (до 5 мкТл), включающем диапазон регистрируемых на обсерватории «Михнево» геомагнитных возмущений (амплитуда исследуемых геомагнитных вариаций не превышала 0,3 мкТл).

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ

Учитывая, что импульсные (с резким ростом амплитуды) вариации геомагнитного поля с большей вероятностью оказывают влияние на микросейсмические колебания, при настоящем исследовании выбирались участки записи магнитометра при повышенной магнитной активности (локальный индекс магнитной активности $K \geq 3$), содержащие такие события. Выделение наведенных вариаций микросейсмического фона осуществлялось на основе спектрально-временного анализа (СВАН), заключающегося в оценке текущего спектра части временного ряда, соответствующего скользящему временному окну [53]. Визуализация спектра мощности в виде СВАН диаграмм позволяет хорошо выделять повышенные амплитудные вариации микросейсмического фона, вызванные геомагнитными импульсами. При определении количественной зависимости по магнитным записям определялся максимум модуля вектора геомагнитных вариаций за вычетом тренда B , а по данным сейсмической регистрации – максимум сглаженных вариаций среднеквадратичной амплитуды скорости сейсмических колебаний.

Оценка тесноты связи между исследуемыми величинами проведена с использованием трех методик вычисления: коэффициента линейной корреляции Пирсона, коэффициентов ранговой корреляции Спирмена и Кендалла [54]. С целью подтверждения статистической значимости корреляционной зависимости применялся метод анализа с привлечением суррогатных рядов данных, для вычисления которых применялся алгоритм, описанный в [55]. Для полученных суррогатных рядов также вычислялись коэффициенты корреляции. Значительное расхождение между коэффициентами корреляции оригинальных и суррогатных рядов свидетельствует о значимой корреляции между исследуемыми величинами амплитуд геомагнитных импульсов и микросейсмического фона.

Временная задержка (лаг) между изменением геомагнитного поля и откликом микросейсмического фона оценивалась расчетом кросс-коррелограммы [56] для каждого рассматриваемого события (когда при геомагнитных импульсах регистрировались вызванные вариации микросейсмического фона). Для установления причинно-следственной связи между исследуемыми величинами применялся тест Грэнджера [57] для лага, определенного по кросс-коррелограмме.

Кривая зависимости между амплитудой геомагнитного импульса B и амплитудой вызванных вариаций сейсмического фона v строилась путем нелинейной аппроксимации методом наименьших квадратов [58]. Все вычисления, связанные с обработкой и анализом цифровых данных, выполнялись в системе MatLab.

Для условий обсерватории «Михнево» наиболее вероятным механизмом преобразования энергии между геомагнитными импульсами и сейсмическими фоновыми колебаниями являются наведенные электрические токи, которые концентрируются в обводненных, а, следовательно, хорошо проводящих зонах Нелидово-Рязанской структуры [59]. В связи с этим представляет интерес анализ динамики магнитного типпера, отражающего изменение электропроводности земной коры [60]. Расчет модуля магнитного типпера выполнялся по алгоритму, основанному на популярной робастной методике, разработанной Дж. Ларсеном [61–62]. По этому алгоритму для вычисления передаточных функций по электромагнитным полям было разработано специальное программное обеспечение.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И ВАРИАЦИЙ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА

Как установлено в предыдущих исследованиях [63–64], на обсерватории «Михнево» наблюдаются импульсные геомагнитные вариации нескольких типов, которые могут считаться основными: SSC-тип, SI-тип, SMI-тип. Во время импульсных вариаций магнитного поля SSC- и SI-типов в большинстве случаев наблюдаются повышенные вариации сейсмического фона. Спектральный анализ показал, что вызванные вариации сейсмического фона, в основном, наблюдаются в частотном диапазоне 0,01–0,1 Гц (в отдельных случаях – 0,001–0,1 Гц). При этом указанные вариации имеют сложный характер и зависят от конкретного геомагнитного возмущения. На рисунке 2 приведены примеры СВАН диаграммы вариаций микросейсмического фона в период геомагнитных возмущений. Как следует из рисунка 2, наблюдаемые вызванные вариации сейсмического фона по времени могут быть как короткими (SI-импульсы), так и весьма продолжительными (SSC-импульсы, предвещающие сильную магнитную бурю). Их начало совпадает с началом геомагнитных вариаций, а максимум амплитуды, как правило, – с максимумом геомагнитного импульса. Однако в ряде случаев (длительные возмущения магнитного поля во время магнитных бурь) наблюдается запаздывание максимальной амплитуды отклика вариаций сейсмического фона на геомагнитные возмущения (рисунок 2-в).

При установлении зависимости между интенсивностью геомагнитных вариаций и откликом сейсмического фона рассматривались события, для которых амплитуды геомагнитных импульсов и вызван-

ных вариаций микросейсмического фона определялись однозначно. Зависимость между амплитудами геомагнитного импульса B и вызванных вариаций среднеквадратической амплитуды скорости колебаний в микросейсмическом фоне ν представлена на рисунке 3.

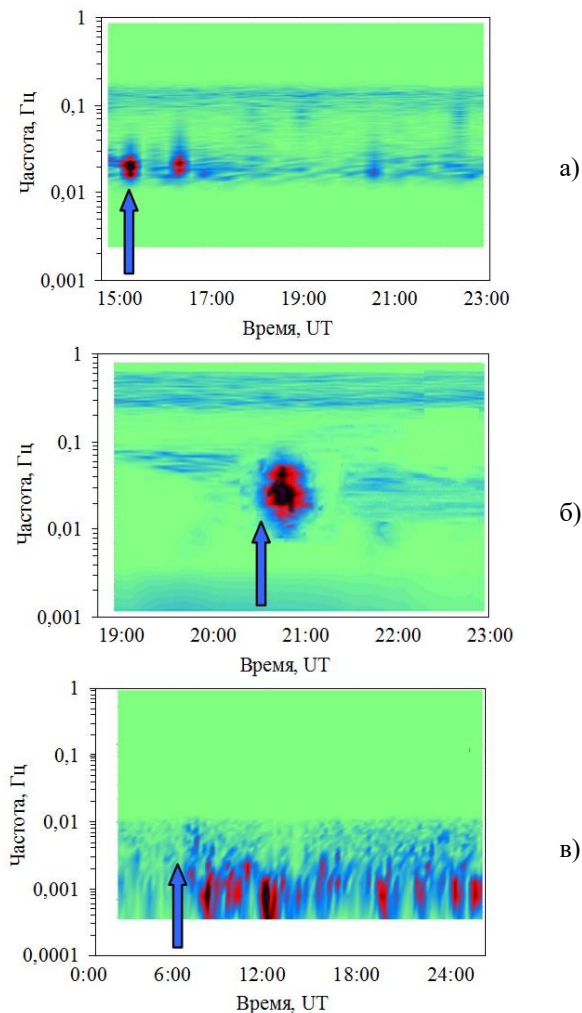


Рисунок 2. Примеры вариаций сейсмического фона (ν) в период геомагнитных возмущений (начало обозначено вертикальными залитыми стрелками). Параметры геомагнитных возмущений: (а) – 30.04.2008 г. – $K=4$; $B=37$ нТл; (б) – 26.12.2015 г. – $K=5$; $B=67$ нТл; (в) – 29.09.2011 г. – $K=6$; $B=120$ нТл.

Из рисунка 3 видно, что более сильным геомагнитным вариациям соответствуют более интенсивные вариации скорости колебаний микросейсмического фона. При этом существенно, что в диапазоне от 15 до 100 нТл величина наведенных вариаций микросейсмического фона растет практически линейно с ростом B , а затем по мере увеличения амплитуды геомагнитных вариаций зависимость $\nu(B)$ «выползает». Это является свидетельством ограниченных возможностей среды в формировании механического отклика на геомагнитные возмущения: наступает насыщение.

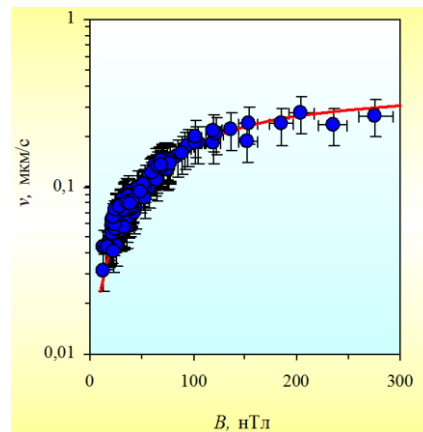


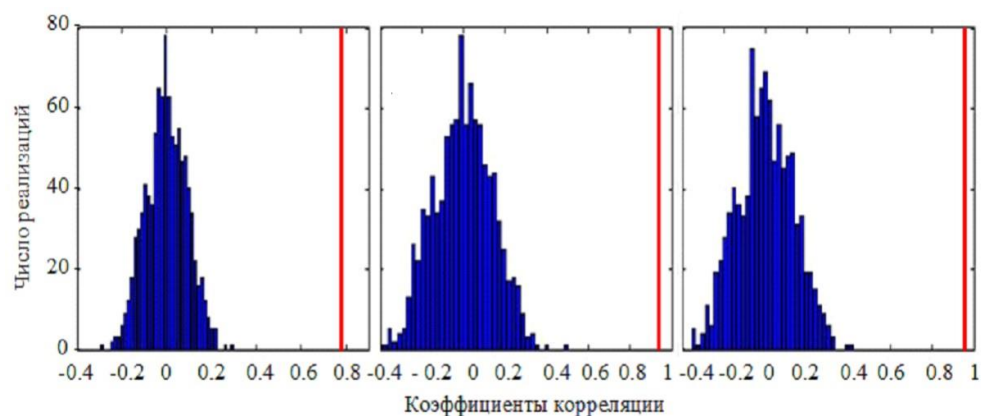
Рисунок 3. Зависимость между среднеквадратичной амплитудой вариаций микросейсмического фона ν , наведенных в период геомагнитных возмущений, и амплитудой геомагнитного импульса B

Полученная зависимость $\nu(B)$ с точностью, достаточной для практических оценок, аппроксимируется зависимостью (B выражено в нТл):

$$\nu = 0,35 \{1 - e^{-0,007B}\} \text{ мкм/с.} \quad (1)$$

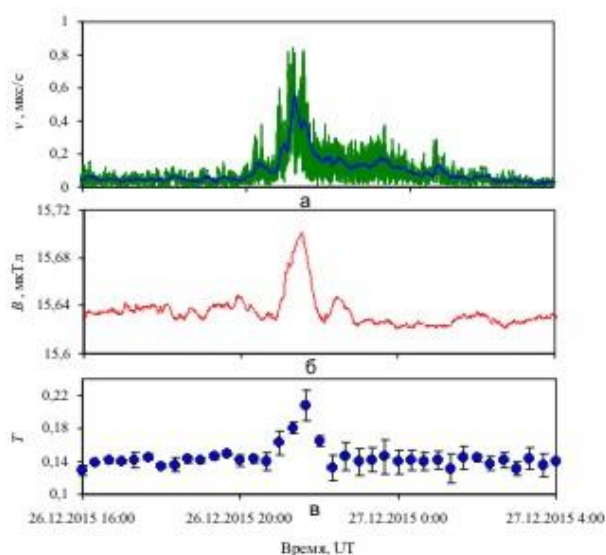
О статистически значимой корреляции свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции, вычисленные по разным методикам при статистической значимости $\leq 0,01$: по Кендаллу – 0,76, по Пирсону – 0,89, по Спирмену – 0,91, а также то, что коэффициенты корреляции оригинальных рядов не попадают в интервал значений, соответствующих суррогатным данным. Результаты вычисления коэффициентов корреляции исходных и суррогатных рядов приведены на рисунке 4.

Рассмотрена оценка временной задержки между изменением геомагнитного поля и откликом микросейсмического фона и проведен анализ причинно-следственной связи между ними на примере синхронных вариаций микросейсмического фона и геомагнитного поля для 26.12.2015 г. (рисунок 5). Вычисленная кросс-коррелограмма свидетельствует о 8-минутной задержке между изменением магнитного поля и вызванными вариациями микросейсмического фона. Тест Грэнджера для лага, равного 8 минутам, показал, что гипотеза о том, что изменения геомагнитного поля не являются причиной изменения величины сейсмических колебаний, опровергается (значение F статистики составляет 23,405, P значение – $1,7 \cdot 10^{-7}$), а принимается гипотеза о том, что изменение микросейсмического фона не влечет изменение вариаций магнитного поля Земли (значение F статистики составляет 0,222, P значение – 0,802). Аналогичные результаты получены для других событий. Таким образом, применение методов статистической обработки данных позволило установить, что именно возмущение геомагнитного поля влечет изменение микросейсмического фона, причем с некоторым запаздыванием.



Вертикальные красные линии – значения коэффициентов корреляции для исходных рядов данных

Рисунок 4. Гистограммы, демонстрирующие число реализаций суррогатных рядов данных с одинаковыми коэффициентами корреляции, вычисленными с использованием разных методов: (а) – Кендалла; (б) – Пирсона; (в) – Спирмена



Вертикальный отрезок – достоверный интервал.
Геофизическая обсерватория «Михнево», 26.12.2015 г.

Рисунок 5. Пример скорости колебаний в микросейсмическом фоне v (а) в период геомагнитных вариаций B (б) ($K=5$) и вычисленного модуля магнитного типпера T (в)

Анализ показал, что после геомагнитного импульса в поведении модуля магнитного типпера отмечаются «скачкообразные» изменения (рисунок 5). Это свидетельствует о том, что при резком и значительном по амплитуде изменении магнитного поля с небольшой задержкой по времени происходит изменение величины наведенных электрических токов. С учетом полученных результатов и результатов ра-

бот [65, 66], можно утверждать, что наличие флюидов играет важную роль в процессе преобразования электромагнитной энергии в энергию механических колебаний. Отмеченное «выполаживание» зависимости (1) можно объяснить тем, что наведенные в среде электрические токи достигают максимума, который определяется количеством проводящего флюида и его конкретными электрохимическими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о наличии зависимости между амплитудой вариаций геомагнитного поля и возможным откликом сейсмического фона, который наблюдается с небольшой задержкой по времени. Выполненные расчеты свидетельствуют о высокой значимости корреляции между указанными величинами, причем именно изменение геомагнитного поля влечет изменение микросейсмического фона. Установлена количественная зависимость между амплитудой геомагнитного импульса B и амплитудой вызванных вариаций сейсмического фона v .

Дальнейшая задача исследований будет связана с установлением возможных физических механизмов, обеспечивающих связь микроколебаний твердой среды с геомагнитными вариациями и проведением аналогичных исследований в других условиях, отличающихся, например, свойствами конкретных участков земной коры, наличием и особенностями распространения дизъюнктивов и наличием флюидов и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Simpson, I.F. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes / I.F. Simpson // Earth and Planetary Science Letters, 1968. – Vol. 3, No. 5. – P. 417–425.
2. Сытинский, А.Д. О зависимости глобальной и региональной сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла солнечной активности / А.Д. Сытинский // Доклады АН СССР, 1982. – Т. 265, № 6. – С. 1350–1353.

3. Сытинский, А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью / А.Д. Сытинский // Известия АН СССР. Физика Земли, 1989. – № 2. – С. 13–30.
4. Сытинский, А.Д. Зависимость сейсмичности Земли от процессов на Солнце, в межпланетной среде и в атмосфере / А.Д. Сытинский // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Т. 2. М.: Научный Мир, 1998. – С. 70–72.
5. Одинцов, С.Д. Солнечная активность и глобальная сейсмичность Земли / С.Д. Одинцов, Г.С. Иванов-Холодный, К. Георгиева // Известия РАН. Серия физическая, 2007. – Т. 71, № 4. – С. 608–610.
6. Шестопалов, И.П. Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности / И.П. Шестопалов, Е.П. Харин // Геофизический журнал, 2006. – Т. 28, № 4. – С. 59–70.
7. Белов, С.В. О взаимосвязях эндогенной активности Земли с солнечной и геомагнитной активностью / С.В. Белов, И.П. Шестопалов, Е.П. Харин // Доклады академии наук, 2009. – Т. 428, № 1. – С. 1–4.
8. Choi, D.R. Earthquakes and solar activity cycles / D.R. Choi, L. Maslov // NCGT Newsletter, 2010. – No. 54. – P. 36–44.
9. Huzaimy, J. M. Possible correlation between solar activity and global seismicity / J. M. Huzaimy, K. Yumoto // Proceedings 2011 IEEE International Conference on Space Science and Communication, Penang Malaysia, 2011. – P. 138–141.
10. Сергеева, Н.А. Исследование связи активности Солнца и сейсмической активности Земли с помощью вейвлет-преобразования / Н.А. Сергеева, И.П. Шестопалов, Л.П. Забаринская, М.В. Нисилевич, М.З. Згуровский, А.А. Болдак, К.В. Ефремов // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле, 2014. – № 1, вып. № 23. – С. 27–34.
11. Жантаев, Ж.Ш. Вариации солнечной и глобальной сейсмической активности в 21–24 солнечных циклах / Ж.Ш. Жантаев, Б.Т. Жумабаев, Г.Я. Хачикян, Н. Тойшиев, Д. Кайраткызы // Известия НАН РК. Серия физическая, 2015. – Т. 4, № 4. – С. 63–70.
12. Herdiwijaya, D. On the possible relations between solar activities and global seismicity in the solar cycle 20 to 23 / D. Herdiwijaya, J. Arif, M.Z. Nurzaman, I.K.D. Astuti // AIP Conference Proceedings 1677, 2015, <https://doi.org/10.1063/1.4930664>.
13. Тарасов, Н.Т. О влиянии солнечной активности на сейсмичность земли / Н.Т. Тарасов // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2017. – С. 356–365.
14. Mazzarella, A. Solar, geomagnetic and seismic activity / A. Mazzarella, A. Palumbo // Nuovo Cimento C, Serie 1, 1988. – Vol. 11 C. – P. 353–364.
15. Лоцинская, Н.И. Связь глобальной энергии землетрясений с солнечной активностью / Н.И. Лоцинская // Вестник Киевского университета. Серия астрономия, 1999. – Вып. 35. – С. 45–50.
16. Georgieva, K. On the relation between solar activity and seismicity on different time scales / K. Georgieva, B. Kirov, D. Atanasov // Journal of Atmospheric Electricity, 2002. – Vol. 22, No. 3. – P. 291–300.
17. Love, J.J. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes / J.J. Love, J.N. Thomas // Geophysical Research Letters, 2013. – Vol. 40. – P. 1165–1170.
18. Барсуков, О.М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения / О.М., Барсуков // Физика Земли, 1991. – № 12. – С. 93–97.
19. Соболев, Г.А. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли / Г.А. Соболев, И.П. Шестопалов, Е.П. Харин // Физика Земли, 1998. – № 7. – С. 85–89.
20. Соболев, Г.А. О связи сейсмичности с магнитными бурями / Г.А. Соболев, Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев // Физика Земли, 2001. – № 11. – С. 62–72.
21. Закржевская, Н.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность / Н.А. Закржевская, Г.А. Соболев // Физика Земли, 2002. – № 4. – С. 3–15.
22. Закржевская, Н.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах / Н.А. Закржевская, Г.А. Соболев // Вулканология и сейсмология, 2004. – № 3. – С. 63–75.
23. Гульельми, А.В. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения / А.В. Гульельми, И.П. Лавров, А.Л. Собисевич // Солнечно-земная физика, 2015. – Т. 1, № 1. – С. 98–103.
24. Дещеревский, А.В. Результаты взаимного корреляционного анализа сейсмичности Гармского полигона и геомагнитных и гелиогеофизических параметров / А.В. Дещеревский, А.Я. Сидорин, Е.П. Харин // Геофизические исследования, 2007. – Т. 7. – С. 14–28.
25. Yesugey, S.C. Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula / S.C. Yesugey // Earth Sciences Research Journal, 2009. – Vol. 13, No. 1. – P. 82–89.
26. Duma, G. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations / G. Duma, Y. Ruzhin // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003. – Vol. 3. – P. 171–177.
27. Liu, J. Seismo-geomagnetic anomalies and $M \geq 5.0$ earthquakes observed in Taiwan during 1988–2001 / J. Liu, C. Chen, Y. Chen, H. Yen, K. Hattori, K. Yumoto // Physics and Chemistry of the Earth, 2006. – Vol. 31. – P. 215–222.
28. Han, P. Principal component analysis of geomagnetic diurnal variation associated with earthquakes: case study of the M6.1 Iwateken Nairiku Hokubu earthquake / P. Han, Q. Huang, J. Xiu // Chinese Journal of Geophysics, 2009. – Vol. 52. – P. 1556–1563.
29. Rabeh, T. Strong earthquakes associated with high amplitude daily geomagnetic variations / T. Rabeh, M. Miranda, H. Milan // Natural Hazards, 2010. – Vol. 53. – P. 561–574.
30. Сычева, Н.А. Солнечные вспышки, вариации уровня сейсмического шума и сейсмический режим северного Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2010. – С. 326–335.
31. Сычева, Н.А. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев // Физика Земли, 2011. – № 3. – С. 55–71.

32. Попова, О.Г. Связь изменения напряженного состояния земной коры с солнечными затмениями и магнитными бурями / О.Г. Попова, А.Д. Жигалин, Ю.Ф. Коновалов // *Геоэкология*, 2011. – № 3. – С.55–71.
33. Дещеревский, А.В. Сравнительный морфологический анализ суточных ритмов геомагнитной активности и сейсмичности / А.В. Дещеревский, А.Я. Сидорин // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 55–68.
34. Тарасов, Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии / Н.Т. Тарасов // *Доклады академии наук*. – 1997. – Т. 353, № 2. – С. 542 - 545.
35. Тарасов, Н.Т. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана / Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова, А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник // *Вулканология и сейсмология*. – 1999. – № 4 - 5. – С. 152 - 160.
36. Тарасов, Н.Т. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии / Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова, А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник // *Геология и геофизика*. – 2001. – Т. 42, № 10. – С. 1641 - 1649.
37. Соболев, Г.А., Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев / М.: Наука, 2003. – 270 с.
38. Авагимов, А.А. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием / А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, Э.Б. Файнберг // *Физика Земли*. – 2005. – № 6. – С. 55–65.
39. Закупин, А.С. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения / А.С. Закупин, А.А. Авагимов, Л.М. Богомолов // *Физика Земли*. – 2006. – № 10. – С. 43–50.
40. Bogomolov, L.M. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic electric effect manifestation / L.M. Bogomolov, P.V. Il'ichev, V.A. Novikov, V.I. Okunev, V.N. Sychev, A.S. Zakupin // *Annals of Geophysics*, 2004. – V. 47, № 1. – P. 65–72.
41. Авагимов, А.А. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энерговоздействии / А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, В.Н. Ключкин // *Физика Земли*, 2006. – № 10. – С. 36–42.
42. Тренский, А.А. Возможное влияние теллурических токов на сейсмичность земной коры в сейсмоактивных областях / А.А. Тренский // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2015. – Т. 55, № 1. – С. 139–144.
43. Danjon A. La rotation de la Terre et le Soleil calme // *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. – 1962. – Vol. 254. – P. 3058–3061.
44. Сытинский, А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами // А.Д. Сытинский // Л.: Гидрометеиздат. 1987. – 100 с.
45. Tavares, M. Influences of solar cycles on earthquakes / M. Tavares, A. Azevedo // *Natural Science*. – 2011. – No. 3. – P. 436–443.
46. Соболев, Г.А. Механоэлектрические явления в Земле / Г.А. Соболев, В.М. Демин // М.: Наука, 1980. – 215 с.
47. Ярославский, М.А. О возможности электросейсмического эффекта / М.А. Ярославский, Н.К. Капустян // *Доклады АН СССР*. – 1990. – Т. 315, №2. – 352–354.
48. Горберх, М.Б. Пондеромоторное действие электромагнитного поля на среду / М.Б. Горберх, Н.И. Колосницын // *Триггерные эффекты в геосистемах*. М.: ГЕОС, 2010. – С. 192–201.
49. Ruzhin, Yu. Interrelation of geomagnetic storms and earthquakes: Insight from lab experiments and field observations / Yu. Ruzhin, M. Kamogawa, V. Novikov // 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2 - 10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract id.# A3.1-68-14.
50. Адушкин, В.В. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // *Физика Земли*, 2012. – № 3. – С. 3–21.
51. Горюнов, Б.Г. Реакция электродинамических сейсмоприемников на внешние магнитные поля / Б.Г. Горюнов, Н.В. Кабыченко, Д.В. Павлов, И.С. Свинцов // *Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли*. М.: ИДГ РАН, 2003. – С. 361–364.
52. Барышев, В.И. Измерение земного магнитного поля магнитометром из аморфного ферромагнитного материала / В.И. Барышев // *Динамические процессы в геосферах*. М.: ГЕОС, 2010. – С. 295–300.
53. Козлов, В.И. Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений / В.И. Козлов, П.Ф. Крымский // Якутск: Якут. науч. центр, 1993. – 163 с.
54. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь // М.: Физматлит, 2006. – 826 с.
55. Middleton, G.V. Data analysis in the Earth sciences using MatLab / G.V. Middleton // New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River, 2000. – 246 p.
56. Granger, C.W.J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods / C.W.J. Granger // *Econometrica*, 1969. – Vol. 37. – P. 424–432.
57. Davis, J.C. Statistics and data analysis in geology / J.C. Davis // New York: John Wiley and Sons, Inc., 2002. – 638 p.
58. Кремер, Н.Ш. Эконометрика / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко // М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 311 с.
59. Лосева, Т.В. Численно-феноменологическая модель взаимосвязи магнитного поля и микроколебания земной коры в зоне влияния крупной тектонической структуры / Т.В. Лосева, М.Ю. Кузьмичева, А.А. Спивак // *Динамические процессы в геосферах*. М.: ГЕОС, 2012. – Вып. 3. – С.84–91.
60. Бердический, М.Н. Магнитовариационное зондирование: Новые возможности / М.Н. Бердический, В.И. Дмитриев, Н.С. Голубцов, Н.А. Мерщикова, П.Ю. Пушкарев // *Физика Земли*, 2003. – №9. – С. 3–30.
61. Larsen, J.C. Transfer functions: smooth robust estimates by least-squares and remote reference methods / J.C. Larsen // *Geophysical Journal International*, 1989. – Vol. 99. – P. 645–663.
62. Larsen, J.C. Robust smooth magnetotelluric transfer functions / J.C. Larsen, R. Mackie, A. Manzella, A. Fiordelisi, S. Rieven // *Geophysical Journal International*, 1996. – Vol. 124. – P. 801–819.

63. Адушкин, В.В. О возможном влиянии геомагнитных вариаций на сейсмический фон / В.В. Адушкин, С.А. Рябова, А.А. Спивак, В.А. Харламов // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2013. – С.208–219.
64. Рябова, С.А. Возмущение сейсмического фона геомагнитными импульсами / С.А. Рябова, А.А. Спивак // Геофизические исследования, 2017. – Т. 8, № 2. – С. 65–76.
65. Спивак, А.А. Геомагнитные вариации на земной поверхности и их связь с динамикой подземных вод / А.А. Спивак, С.А. Рябова, Э.М. Горбунова // Вестник НЯЦ, 2015. – Вып. 4. – С. 98–106.
66. Рябова, С.А. Магнитовариационные параметры в условиях среднеширотной Геофизической обсерватории «Михнево» / С.А. Рябова // Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС, 2016. – С. 121–129.

**«МИХНЕВО» ОРТАЕҢДІК ОБСЕРВАТОРИЯДА МИКРОСЕЙСМИКАЛЫҚ
АЯНЫ ГЕОМАГНИТТІК ИМПУЛЬСТАРМЕН АУЫТҚУЫН ЗЕРДЕЛЕУ**

Рябова С.А.

*Ресей ғылыми академиясының Геосфералар динамикасы институты
федераль мемлекеттік бюджеттік ғылым мекемесі, Мәскеу қ., Ресей*

Ресей ғылыми академиясы Геосфералар динамикасы институтының ортаеңдік «Михнево» геофизикалық обсерваторияның жағдайлары үшін импульстік геомагниттік вариацияларына сейсмикалық аяның елесі зерттеледі. SSC- және SI-типтеріндегі магниттік өрістің импульстік вариацияларында 0,01–0,1 Гц (бөлегінде 0,001–0,1 Гц) жиіліктік ауқымында сейсмикалық аяның көбінесе жоғары вариациялары байқалады. Статондеу әдісімен геомагниттік өрісінің ауытқуы микросейсмикалық аяның өзгерілуін тудыратыны (бір аз кешігумен) анықталған. Мәнді корреляция айқындалған және геомагниттік импульстің амплитудасы мен сейсмикалық аяның өндірілген вариацияларының амплитудасы арасында тәуелдіктің сандық бағасы алынған. Геомагниттік импульстан кейін, уақытында шамалы кідірісімен, магниттік типпердің модулі жүрісінде келтірілген электр токтар мәндерінің «секіріс тәріздес» өзгерістері байқалады.

**INVESTIGATION OF THE RESPONSE OF THE MICROSEISMIC BACKGROUND
TO GEOMAGNETIC IMPULSES AT THE MID-LATITUDE OBSERVATORY “MIKHNEVO”**

S.A. Riabova

Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The response of the seismic background to pulsed geomagnetic variations is investigated for the conditions of the mid-latitude Geophysical observatory “Mikhnevo” of the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences. During the impulse variations of the magnetic field of SSC- and SI-types, in most cases, increased variations of the seismic background are observed in the frequency range of 0.01–0.1 Hz (in some cases, 0.001–0.1 Hz). The application of methods of statistical data processing made it possible to establish that it is the perturbation of the geomagnetic field that entails a change in the microseismic background and with some delay. The significant correlation between the amplitude of the geomagnetic impulse and the amplitude of the induced variations of the seismic background was established and the quantitative relationship between them was obtained. The analysis showed that after the geomagnetic impulse with a short delay in the behavior of the magnetic tipper module, “jumplike” changes (i.e., a change in the magnitude of the induced electric currents) are observed.