

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Рябова Светлана Александровна

**ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ И СИНХРОННЫЕ
С НИМИ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И
МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА
В УСЛОВИЯХ СРЕДНИХ ШИРОТ**

Специальность:

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Спивак Александр Александрович

Москва – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИХ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССАМИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	12
1.1. Вековое изменение магнитного поля Земли	12
1.2. Основные периодичности вариаций геомагнитного поля (с периодом от нескольких дней до нескольких лет)	15
1.3. Регулярные суточные вариации магнитного поля Земли	19
1.4. Геомагнитная активность и ее связь с солнечной активностью	22
1.5. Магнитотеллурические передаточные функции и методы их оценки	26
1.6. Влияние солнечной и геомагнитной активности на геодинамические процессы	35
Выводы к главе 1: Постановка цели исследования	40
Глава 2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ, МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ РЯДОВ	43
2.1. Использованные данные и краткая характеристика района инструментальных наблюдений	43
2.2. Исследование составляющих временных рядов	56
2.3. Анализ геомагнитных данных	62
2.4. Оценка магнитовариационных параметров	63
2.5. Обработка данных при совместном анализе геомагнитных импульсов и сейсмических колебаний	65
2.6. Анализ связей между временными рядами	66
Выводы к главе 2	68
Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ	69
3.1. Длиннопериодные геомагнитные вариации	69
3.2. Суточные вариации магнитного поля Земли	90
3.3. Особенности геомагнитной активности	99
Выводы к главе 3	108
Глава 4. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА	110
4.1. Временные вариации магнитовариационных параметров	110

4.2. Закономерности длиннопериодных изменений режима подземных вод	115
4.3. Совместные вариации магнитного типпера и уровня подземных вод.....	117
Выводы к главе 4.....	120
Глава 5. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА.....	121
5.1. Некоторые статистические характеристики геомагнитных вариаций импульсного типа	121
5.2. Особенности микросейсмического фона	124
5.3. Вариации микросейсмического фона, вызванные действием геомагнитных импульсов	127
5.4. Проверка реакции сейсмоприемника на действие магнитного поля	134
Выводы к главе 5.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и практическая значимость. Земля с внешними геосферами представляют собой единую, целостную геофизическую систему, которая характеризуется как открытая, неравновесная, самоорганизующаяся и саморазвивающаяся [3]. При этом геосферы под действием как внешних, так и внутренних возмущений непрерывно взаимодействуют друг с другом, обмениваясь энергией, массой и импульсом. В качестве объединяющего фактора внешних и внутренних геосфер выступают геофизические поля, среди которых особо выделяется магнитное поле.

Научная и практическая значимость исследования вариаций геофизических полей, в том числе геомагнитного поля, на границе земная кора – атмосфера обусловлена рядом причин. Именно в приповерхностной зоне Земли формируется режим среды обитания в условиях эндогенных и экзогенных возмущений. Здесь же сосредоточена практически вся производственная деятельность человека, причем, по мере совершенствования, создания и внедрения новых, современных технологий (в особенности прецизионных) повышается значимость исследований, связанных с установлением характеристик геофизических полей. Поскольку граница земная кора – атмосфера характеризуется резким изменением свойств контактирующих сред и значительными потоками энергии и массы, по временным вариациям геофизических полей, зарегистрированных в приповерхностном слое Земли, можно судить о закономерностях поведения как внешних, так и внутренних геосфер.

В связи с тем, что в настоящее время отмечаются уменьшение напряженности, увеличение скорости западного дрейфа, а также изменение конфигурации силовых линий геомагнитного поля [117], которые свидетельствуют о возможности инверсии (переполюсовка) магнитного поля Земли в ближайшее время [71, 300], появляется необходимость получения информации о длиннопериодных изменениях геомагнитного поля (вековая вариация, джерки). Кроме того, анализ длиннопериодных вариаций играет важную роль при оценке достоверности и совершенствовании математических и расчетных моделей описания и прогноза вариаций магнитного поля, при выявлении локальных особенностей его динамики, а также при оценке электропроводности внешнего ядра и нижней мантии и при разработке моделей проводимости недр Земли

[84, 245, 634]. Вместе с тем повышенное внимание научного сообщества к вековой вариации геомагнитного поля на протяжении многих лет продиктовано тем обстоятельством, что в процессе развития теории и моделей генерации главного магнитного поля Земли для их проверки и совершенствования стало важным выявление особенностей поведения вековой вариации.

Информация о цикличности геомагнитных вариаций и статистике сильных возмущений широко привлекается при разработке механизмов солнечно-земных связей, в частности, взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли [109, 637], при совершенствовании магнитотеллурических методов [24, 134], при разработке новых способов диагностики геодинамического состояния земной коры [53], при исследовании метеорологических процессов в атмосфере и изменений климата [85, 285].

Интерес к статистике сильных геомагнитных возмущений, главным образом магнитных бурь, возрос после обнаружения факта, что магнитные возмущения негативно воздействуют на технические системы и сооружения, протяженные электропроводящие системы, в том числе, на линии электропередач [38, 212, 625, 683], металлические нефте- и газопроводы [240], линии электрифицированных железных дорог [76, 321] и т.д. Например, вся серьезность такого воздействия стала очевидной, когда во время магнитной бури 13 марта 1989 г. произошло короткое замыкание в главном трансформаторе Квебекского гидроузла, что вызвало отключение электричества в Канаде и США и экономический ущерб миллиардного порядка [225, 229].

Не менее перспективным представляется изучение регулярных суточных вариаций, характеристики которых содержат информацию, как о глобальных, так и о локальных источниках. Данные о регулярных суточных вариациях широко используются при исследовании электродинамики ионосферы Земли и ее связи с магнитосферой и нижней атмосферой [279, 534], при мониторинге активности солнечной радиации [601], при определении базового уровня для геомагнитных индексов [432], а также при оценке электропроводности в недрах Земли [241, 243, 501].

Некоторые вариации геомагнитного поля обусловлены периодическими изменениями физико-механических свойств приповерхностных участков земной коры, например, ее электропроводности. Информацию об изменении электропроводности земной коры можно получить на основе анализа временных вариаций

магнитотеллурических функций, что востребовано не только при изучении геоэлектрического строения земной коры и верхней мантии [125-126, 319, 430], при мониторинге активности вулканов [376, 382, 583], при проведении поисково-разведочных работ [326], при исследовании структуры геотермальных районов [122, 479, 486, 577-578], при диагностике изменений гидрогеологического режима территории [97, 100, 104, 516] и при исследовании степени разрушения захороненных отходов [487], но также при мониторинге сейсмотектонических процессов в литосфере [96, 98, 101-103, 123, 127, 401]. Одним из факторов, оказывающих значительное влияние на временные вариации магнитотеллурических функций, является изменение степени обводненности горных пород [96, 99, 101, 104].

На границе земная кора – атмосфера взаимодействие геофизических полей разной природы может привести к энергообмену между полями разной природы, к генерации полей одной природы поля другой природы. Эффективность этих процессов увеличивается в зоне тектонических нарушений [149, 153]. Можно ожидать существование взаимосвязи между вариациями магнитного поля Земли и сейсмотектоническими процессами, в частности, вариациями колебаний уровня твердой поверхности земли (возмущением микросейсмического фона). Результаты анализа связей между геомагнитными вариациями и микросейсмическим фоном могут внести существенный вклад в решение фундаментальной проблемы установления взаимодействия и преобразования геофизических полей разной природы. Кроме того, определение зависимостей между геомагнитными вариациями, микросейсмическим фоном и уровнем подземных вод дает широкие перспективы для обнаружения и исследования динамики развития зон с аномальными свойствами, например, разломов, карстов и таликов; для определения степени современной активности разломных зон и их участков; для усовершенствования существующих и для разработки новых методов диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния локальных участков земной коры, что, в свою очередь, востребовано, например, при мониторинге геодинамического состояния участков земной коры в зонах особо ответственных объектов и сооружений (АЭС, места захоронения токсичных и радиоактивных отходов, гидроузлы и т.д.) [30, 173].

В связи с широким спектром фундаментальных и прикладных задач, при решении которых важно иметь всестороннее представление о динамике геомагнитного поля в

разных временных масштабах и о его связи с процессами в твердой земле и атмосфере, необходимо провести анализ временных вариаций геомагнитного поля в приповерхностном слое атмосферы Земли и его связи с гидро- и геодинамическими процессами.

Следует особо подчеркнуть, что успешное рассмотрение всех перечисленных выше вопросов, связанных с установлением характеристик геомагнитного поля и разработкой моделей, возможно только при условии проведения постоянного инструментального мониторинга с анализом его результатов.

Цель настоящего исследования заключается в установлении особенностей геомагнитных вариаций с учетом их возможных связей с микросейсмическим фоном и уровнем подземных вод на средних широтах.

Для достижения поставленной цели исследований необходимо было решить следующие **основные задачи**:

- Сбор и предварительный анализ данных инструментальных наблюдений на среднеширотных обсерваториях за период 2008 – 2017 гг.
- Освоение и адаптация имеющихся методов обработки и анализа цифровых рядов данных, разработка программного обеспечения специальных задач.
- Установление основных особенностей (вековая вариация, периодичности от 6 часов до 1 года, регулярные суточные вариации) геомагнитных вариаций в условиях средних широт.
- Анализ магнитной активности по данным обсерватории "Михнево" с использованием K -индекса геомагнитной активности.
- Оценка передаточных функций магнитного поля (магнитного типпера, магнитного тензора) и исследование синхронных вариаций магнитного типпера на земной поверхности и уровня подземных вод безнапорного водоносного горизонта для условий обсерватории "Михнево".
- Исследование зависимостей между геомагнитными вариациями импульсного типа и вариациями микросейсмического фона для условий обсерватории "Михнево".

Используемые данные: В работе использованы результаты непрерывных инструментальных наблюдений за геофизическими полями на среднеширотной геофизической обсерватории "Михнево" Института динамики геосфер (54,959° с.ш.;

37,766° в.д.), расположенной в зоне с низким уровнем шумовых помех, вдали от источников техногенной природы, что обеспечивает устойчивую регистрацию магнитного поля, микросейсмического фона и уровня подземных вод. Кроме того, при проведении исследований использовались данные, полученные на станциях Международной магнитной сети INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network), данные наблюдений за солнечной активностью, размещенные на сайте Геофизического центра данных в Боулдере, а также значения планетарного геомагнитного индекса K_p (Германский научно-исследовательский центр геонаук).

Используемые методы: В работе используются современные методы вейвлет-анализа, спектрального анализа, сингулярный спектральный анализ, корреляционный анализ, статистические методы, методы численного моделирования, методы оценки магнитотеллурических функций, а также специфические алгоритмы, разработанные для обработки и анализа данных регистрации геофизических полей.

Научная новизна:

- Впервые выделены джерки 2011 г. и 2014 г. по данным регистрации геомагнитного поля на Геофизических обсерваториях "Михнево" и "Бельск".
- На основе результатов инструментальных наблюдений установлены периодические геомагнитные вариации, имеющие спорадический по интенсивности и скейлинговый характер.
- Впервые показано, что расщепление спектральных составляющих геомагнитных вариаций объясняется наличием в их спектре гармоник, связанных с волнами лунно-солнечного прилива, а также гармоник, обусловленных модуляцией меньших периодов более длиннопериодными вариациями.
- Установлены годовой сдвиг геомагнитной активности в районе Геофизической обсерватории "Михнево" относительно 24-ого цикла солнечной активности и асимметрия равноденствующих максимумов геомагнитной активности при доминировании весеннего максимума.
- Впервые установлена периодичность магнитотеллурических функций и определена зависимость между уровнем подземных вод и магнитным типпером для района Геофизической обсерватории "Михнево".

- Впервые установлена количественная зависимость между амплитудой геомагнитных вариаций импульсного типа и амплитудой вариаций сопровождающих их микросейсмических сигналов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- В вековой вариации геомагнитного поля на Геофизических обсерваториях "Михнево", "Борок" и "Бельск" наблюдаются джерки в 2011 г. и 2014 г. Геомагнитные вариации с периодами от 6 часов до 1 года в условиях средних широт имеют скейлинговый характер. Установлен эффект чередования периодов увеличения и деградации интенсивности геомагнитных вариаций (перемежаемость).

- Спектральные составляющие геомагнитных вариаций (в диапазонах 13,5 и 27 суток, околосуточном и полусуточном диапазонах) обусловлены совокупностью двух факторов: наличием гармоник, соответствующих лунно-солнечным приливным волнам, и наличием гармоник, вызванных модуляцией большими периодами. В 24-ом цикле солнечной активности для геомагнитной активности в условиях Геофизической обсерватории "Михнево" характерен сдвиг на 1 год относительно солнечной активности, причем, максимум геомагнитной активности наблюдается в период весеннего равноденствия.

- Изменение уровня подземных вод безнапорного горизонта сопровождается вариациями магнитного типпера, отмечается линейная зависимость между уровнем подземных вод и магнитудой магнитного типпера.

- Геомагнитные импульсы и внезапные начала магнитных бурь сопровождаются повышенными вариациями микросейсмического фона в диапазоне частот 0,01 – 0,1 Гц. Установлен линейный рост амплитуды вариаций микросейсмического фона при увеличении амплитуды геомагнитных импульсов в диапазоне до ~ 100 нТл, при дальнейшем увеличении амплитуды геомагнитных импульсов амплитуда вариаций микросейсмического поля растет существенно медленнее.

Достоверность полученных результатов: Достоверность полученных результатов подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, использованием поверенных средств измерений, современных компьютерных программ и методов обработки и анализа цифровых рядов данных.

Личный вклад автора: Автором выполнены аналитический обзор научной литературы по теме диссертации, сбор и обработка цифровых данных, полученных в результате сейсмической регистрации, регистрации геомагнитного поля и уровня подземных вод, а также адаптация методов анализа и обработки данных к поставленной цели и задачам. Разработаны программные коды в среде MatLab и на языке Fortran для обработки и анализа цифровых рядов инструментальных наблюдений и расчета магнитотеллурических функций разными методиками. В ходе работы автор принимал непосредственное участие в постановке задач и анализе полученных результатов.

Апробация работы: Основные положения работы докладывались на 24 российских и 4 международных конференциях:

54-ой, 55-ой, 56-ой, 57-ой, 58-ой и 59-ой научных конференциях МФТИ (г. Москва, 2011-2016 гг.), Ломоносов 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 (г. Москва, 2013-2018 гг.), Втором, Третьем Всероссийских семинарах-совещаниях "Триггерные эффекты в геосистемах" (г. Москва, 2013, 2015 гг.), Генеральных Ассамблеях 2017 года Европейского геофизического союза (г. Вена, Австрия, 2017 гг.), Школа молодых ученых ИДГ РАН "Динамические процессы в геосферах" (г. Москва, 2015 г.), Восьмых и Девятых научных чтениях Булашевича (Екатеринбург, 2015, 2017 гг.), IGU Regional conference "Geography, culture and society for future Earth" (г. Москва, 2016 г.), VIII Международной конференции "Мониторинг ядерных испытаний и их последствий" (г. Курчатов, Казахстан, 2014 г.), Moscow International School of Earth Sciences (г. Москва, 2016 г.), IV Всероссийской конференции "Триггерные эффекты в геосистемах" с международным участием (г. Москва, 2017 г.), IV Школе-конференции "Гординские чтения" (г. Москва, 2018 г.), 19-й и 20-й научно-практических конференциях по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа "Геомодель 2017" и "Геомодель 2018" (г. Геленджик, 2017, 2018 г.), 72-й Международной молодежной научной конференции "Нефть и газ 2018" (г. Москва, 2018 г.), 7th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (г. Москва, 2018 г.), Международной конференции "Магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов 2018" (г. Москва, 2018 г.).

Результаты работы были доложены на 88-ой сессии Научно-методического совета по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (НМС ГГТ) Минприроды России (г. Санкт-Петербург, 2014 г.).

По теме работы автором опубликовано 28 работ, из которых 7 статей в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации.

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 175 страниц машинописного текста, включая 80 рисунков, 14 таблиц. Список используемой литературы включает 691 наименование.

Благодарности: Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, д.ф.-м.н. А.А. Спиваку за помощь при выполнении работы, академику В.В. Адушкину за проявленный интерес к работе, помощь в постановке исследований и обсуждении результатов, к.т.н. А.Н. Ляхову за консультативную помощь, к.т.н. И.С. Свинцову и к.т.н. В.И.Барышеву за помощь при проведении лабораторных экспериментов, Т.В. Челюбеевой за предоставление сейсмических данных, к.ф.-м.н. Э.М. Горбуновой за предоставление данных регистрации уровня подземных вод и помощь в их анализе, к.т.н. В.А. Харламову за помощь в освоении программного пакета MatLab. Автор выражает также глубокую признательность д.ф.-м.н. Ю.И. Зецеру, д.ф.-м.н. С.И. Козлову за проявленный интерес и помощь при формулировке основных результатов настоящей работы.

ГЛАВА 1. ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ И ИХ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССАМИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Вековое изменение магнитного поля Земли

Вековая вариация. Геомагнитное поле, формирующееся в результате сложных конвективных движений и магнитогидродинамических процессов в жидком ядре Земли, не является постоянным и подвержено ряду воздействий как экзогенного, так и эндогенного происхождения [120, 182, 254, 536].

Как известно, самыми медленными изменениями магнитного поля Земли во времени являются периодичности с периодами от нескольких лет до нескольких тысяч лет (вековая вариация) [29, 222, 547]. Эта вариация обусловлена процессами, происходящими в недрах Земли, в частности, перемещением вещества в железоникелевом электропроводящем внешнем ядре Земли вследствие тепловой и композиционной конвекции [327], распространения магнитогидродинамических волн и диффузионных процессов [333].

Впервые вековое изменение геомагнитного поля предположил Г. Геллибранд [345], опираясь на установленное уменьшение величины магнитного поля в результате анализа данных измерений магнитного склонения, выполненных в период с 1580 г. по 1634 г. в Лаймхаусе (район Лондона). Впоследствии доступность достаточно длинных рядов данных и развитие методов археомагнетизма позволили выделить длиннопериодные вариации геомагнитного поля с периодами от 13 до 12000 лет [31, 56, 75, 105, 195, 282]. На основе детального анализа геомагнитных вариаций выявлены основные особенности вековой вариации, в частности: появление спорадических мест увеличения амплитуды вариаций (центр или фокус векового хода) [42, 73, 119, 130]; смещение во времени фокусов (центров) мировых магнитных аномалий в западном направлении, которое принято называть западным дрейфом магнитного поля [139, 390, 447, 521, 677]; монофрактальный характер этой вариации на больших временных масштабах [128-129]. По данным инструментальных наблюдений за вариациями геомагнитного поля установлено, что изменение величины его компонент за год (вековой ход) составляет примерно десятки нТл, причем эта величина для одного и того же пункта наблюдений может существенно различаться в разные годы [384, 455].

Аналитические модели геомагнитного поля. Эффективным подходом к решению вопроса временных характеристик вековой вариации стало построение аналитических моделей, которые нашли широкое применение в фундаментальных исследованиях, включая исследования долгосрочной динамики главного поля Земли, космической погоды, локальных магнитных аномалий в земной коре, а также в качестве источника ориентировочной информации при поиске полезных ископаемых [219, 472]. Эти математические представления традиционно строятся на основе степенных рядов по долготе и широте или по гармоническим многочленам. Среди моделей, достаточно хорошо описывающих и предсказывающих вековое изменение компонент магнитного поля и его ускорения, можно отметить модели серий *IGRF*, *CHAOS* и *POMME*, постоянно совершенствующиеся привлечением новых данных регистрации магнитного поля Земли.

Международное признание получили модели серии International Geomagnetic Reference Field (*IGRF*) / Definitive Geomagnetic Reference Field (*DGRF*), регулярно выпускаемые Международной ассоциацией геомагнетизма и аэрономии каждые 5 лет. Модель *IGRF* – это математическое представление (в основном эмпирическое), состоящее из набора коэффициентов Гаусса, медленно меняющейся части геомагнитного поля внутреннего происхождения для конкретной эпохи, начиная с 1900 года. Модель *IGRF* обновляется данными, полученными в течение следующих 5 лет после выпуска предыдущей версии модели, включая геомагнитные измерения на спутниках (при возможности таковых), на геомагнитных обсерваториях и дополнительных станциях, иногда также привлекаются магнитные съемки с судов и самолетов. Уточненная предыдущая версия модели *IGRF*, называемая *DGRF*, описывает динамику геомагнитных вариаций, которая наблюдалась в течение последних 5 лет. Значение поля между эпохами моделей *DGRF* определяется линейной интерполяцией коэффициентов моделей, включающих тот промежуток времени, в который значение поля должно быть вычислено. Наблюдаемые изменения магнитного поля экстраполируются для прогноза значений поля на следующие 5 лет. Последняя версия модели *IGRF* (*IGRF-12*) [616], рассчитанная для эпохи 2015.0, была выпущена в декабре 2014 г.

Джерки. В первой производной по времени геомагнитного поля, т.е. вековой вариации, проявляется временная эволюция главного магнитного поля Земли. Наиболее

быстрыми изменениями наклона этой магнитной вековой вариации являются так называемые геомагнитные джерки [284], которые имеют временные масштабы от нескольких месяцев до нескольких лет. Эти события наблюдаются в магнитных данных как внезапные V-образные изменения в наклоне вековой вариации, другими словами, как резкое изменение второй производной по времени [448]. Обычно геомагнитные джерки особенно заметны в восточной составляющей, которая, как предполагается, менее подвержена влиянию внешних полей [525]. Впервые резкие изменения в вековой вариации отмечены в работах [116, 648]. С тех пор при применении различных методов анализа к геомагнитным данным обсерваторий было выявлено и исследовано много других событий джерков в XX веке, наблюдающихся как в локальном, так и глобальном масштабе [131, 286, 425].

Широко исследованы пространственно-временные характеристики джерков, выявленных в вариациях магнитного поля в начале XXI века: 2003 г. [328, 502, 654], 2007 г. [231, 274, 410, 412]. Привлечение данных, полученных предыдущими исследователями, позволило идентифицировать джерки в прошлом [191, 407, 438, 443, 466, 581]. В настоящее время при исследовании вариаций компонент геомагнитного поля в регионе Южной Атлантики/Африки, в Европе и в Северо-Западной Атлантике, а также в Австралии удалось идентифицировать джерки 2011 г. [271, 273, 332, 413] и 2014 г. [409, 624] с небольшими расхождениями по времени. Это позволяет сделать вывод о том, что джерки наблюдаются с регулярной частотой (примерно 3 – 4 года) с 1999 г.

Многие авторы однозначно утверждают [43, 192], что все известные джерки имеют схожие морфологические характеристики. Вопросу локальности геомагнитных джерков посвящен целый ряд работ [298, 305, 502, 522], однако, определенного ответа на вопрос, каким именно образом джерки распределены в пространстве, не существует до настоящего времени, в связи с тем, что джерки наблюдаются как в глобальном, так и в локальном масштабах, причем закономерности появления глобальных и локальных джерков не выявлены.

Что касается исследования происхождения геомагнитных джерков, в настоящее время это явление связывают с процессами в недрах Земли [194, 231, 445]. Механизм генерации джерков все еще обсуждается. Согласно мнению разных исследователей он может быть связан с нестабильностью в тороидальном магнитном поле [221, 542]; с

взаимодействием альвеновских волн в жидком ядре [288, 375]; с изменениями в структуре потока жидкого внешнего ядра Земли [503, 568]; с неустойчивостями (например, неустойчивость Экмана–Гартмана) на границе ядро – мантия [303]; с процессами, обусловленными спиральностью турбулентных движений в ядре [174].

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что для магнитного поля Земли характерно медленное изменение с периодами от нескольких лет до нескольких тысяч лет (вековая вариация), которое можно с некоторым приближением описать аналитическими моделями, например, моделями серии *IGRF/DGRF*. При этом важной особенностью временной эволюции вековой вариации является изменение наклона первой производной по времени вариаций геомагнитного поля (джерк).

В рамках исследования вековой вариации остается ряд не до конца решенных вопросов таких, например, как оценка динамики длиннопериодных вариаций магнитного поля; возможности ее описания и прогноза на основе известных аналитических моделей; пространственно-временные масштабы джерков. Привлечение данных из разных регионов, в частности, расположенных на средних широтах, позволит расширить представление о временной эволюции вековой вариации, в том числе, джерков, а сопоставление данных геомагнитных обсерваторий с моделью *IGRF* позволит оценить достоверность новой версии этой модели для описания локальных изменений магнитного поля Земли, выделить локальные аномалии и адаптировать модель, описывающую и прогнозирующую динамику временных вариаций геомагнитного поля для конкретных условий.

1.2. Основные периодичности вариаций геомагнитного поля (с периодом от нескольких дней до нескольких лет)

Наряду с вековыми изменениями геомагнитного поля особое внимание уделяется исследованию периодичностей вариаций магнитного поля Земли, а также процессов их обуславливающих. Многочисленные работы показали, что часть периодических вариаций, в частности 11-летняя периодичность и ее обертоны [189, 543, 574, 684] могут быть вызваны внешними источниками, в том числе солнечным циклом Швабе [344, 667], его гармониками [293-294] и квазидвухлетней вариацией солнечной активности [396, 596]. Происхождение вариаций с периодом примерно 22 года, близким к удвоенному циклу солнечной активности (цикл Хейла), не вполне ясно [267, 275, 546], поскольку его нельзя связать с внешними источниками [195, 418], так как, во-первых,

периодичность хорошо проявлялась только на отдельных обсерваториях [287, 292], на других она была слабой или вообще не обнаружена [301, 336, 351]; во-вторых, в местах, где эта периодичность выявлена, она не имела общую фазу.

Поскольку длинные временные ряды регистрации вариаций геомагнитного поля часто недоступны, подробнее исследуются особенности периодичностей геомагнитных вариаций с периодами от 1 года до 1 суток.

Годовая и полугодовая периодичности. Впервые годовая периодичность геомагнитных вариаций была отмечена на основе анализа данных наблюдений за среднечасовыми вариациями склонения на четырех британских обсерваториях (Торонто, Илобартон, мыс Доброй Надежды и Святая Елена) [547]. Впоследствии годовая периодичность была обнаружена и для других составляющих магнитного поля [41, 238, 293, 424, 655], а также для индексов геомагнитной активности [301, 336, 350-351]. Наличие годовой периодичности может быть объяснено изменением освещенности Земли Солнцем [286]. В серии работ [441, 446] предполагается, что годовая вариация обусловлена сезонной модуляцией Sq -вариации, а также перемещением средней широты кольцевого тока на север в зимний период и на юг в летний период. Еще один механизм предложен в [682], где наличие годовой периодичности связывается с асимметричным распределением скорости солнечного ветра по гелиографическому экватору.

Полугодовая периодичность геомагнитного поля впервые установлена в работе [283] и подтверждена результатами более поздних работ [363, 424, 442, 655]. Для объяснения полугодовой геомагнитной вариации были предложены следующие механизмы: годовое изменение направления оси Земли (аксиальная гипотеза) [283, 541]; годовое изменение гелиографической широты Земли в диапазоне от $+7,2^\circ$ до $-7,2^\circ$ (равноденственная гипотеза) [207, 464, 480]; полугодовая вариация южной компоненты межпланетного поля, вызванная изменением этой компоненты в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат относительно солнечно-эклиптической системы координат (эффект Рассела-Макферона) [545]. Эффект Рассела-Макферона был расценен многими авторами как основная причина сезонных колебаний геомагнитных вариаций [505-506, 579, 602]. Тем не менее, в ряде исследований установлено, что величина этого эффекта слишком мала, чтобы обуславливать полугодовые изменения магнитного поля Земли [216, 276, 458, 681], тогда как фундаментальное значение имеет равноденственный эффект [277, 437]. Отмечается [278], что вклад трех механизмов

(аксиальный, равноденственный и Рассел-Макферрона) в модуляцию полугодичных вариаций зависит от конкретных условий.

Периодические вариации с периодами в несколько суток. Тенденция повторяемости геомагнитных вариаций через 27 суток впервые установлена в работах [230, 639]. Последующие исследования [207, 208, 215, 270, 360] показали, что частота появления сильных геомагнитных возмущений также проявляет эту периодичность. Развитие спектральных и корреляционных методов позволило выявить ярко выраженную вариацию с периодом 27 суток не только в индексах геомагнитной активности, но и в вариациях компонент геомагнитного поля [301, 310, 336, 555, 561, 653]. В пользу вероятной связи 27-суточной периодичности с солнечным источником свидетельствует близость этого периода к среднему периоду дифференциального вращения Солнца [254, 456], варьирующемуся от 25 суток на солнечном экваторе до 30 суток на полюсах. 27-суточную периодичность геомагнитных вариаций можно объяснить сохранением конфигурации активных областей, наблюдаемой с Земли при вращении Солнца вокруг собственной оси, поскольку время существования активных областей на солнечном диске, в целом, превышает один месяц [223, 575-576].

Впоследствии удалось выявить ряд периодических вариаций геомагнитного поля с периодами меньше периода вращения Солнца вокруг собственной оси (период Каррингтона), в частности, с периодом, равным его половине (13,66 суток) [301, 336, 402, 483]. Эту периодичность связывали с секторной (двух- или четырех- в зависимости от фазы солнечного цикла) структурой межпланетного магнитного поля [351]. Вместе с тем, более поздние исследования показали, что в качестве основной причины формирования примерно двухнедельной периодичности нельзя рассматривать секторную структуру [481], а наличие этой периодичности вызвано достижением Земли двух высокоскоростных потоков солнечного ветра за одно вращение Солнца вокруг оси (образующихся из двух областей, расположенных на расстоянии 180° друг от друга по солнечной долготе), причем эффект максимален в период спада солнечной активности [202, 329].

Наряду с 27-суточной и примерно двухнедельной периодичностями геомагнитных вариаций в нескольких работах отмечаются периодичности с периодами 9 и 6 суток (тенденция к повторяемости которых существенно возросла в последние два солнечных цикла [203, 351, 402, 411, 483]), вероятно, обусловленные секторной

структурой межпланетного магнитного поля [185, 664] или флуктуациями силы кольцевого тока магнитосферы [203]. В качестве физического объяснения секторной структуры межпланетного магнитного поля для 23-ого и 24-ого циклов солнечной активности предлагается асимметрия солнечного динамо [434, 474]. Кроме того, период 9 суток близок к времени нарастания энергии в зоне корональных дыр для создания высокоскоростного потока солнечного ветра [641]. Недавние исследования [429] показали, что 9-суточная периодичность геомагнитной активности в 2005 г. обусловлена вариацией солнечного ветра с тем же периодом [615], которая, в свою очередь, связана с распределением солнечных корональных дыр по солнечной долготе (триада дыр, расположенных примерно на расстоянии 120° друг от друга по солнечной долготе).

Механизм генерации периодичности около 60 суток, отмеченной в работах [269, 291], пока не вполне ясен.

Вопросу о возможной модуляции геомагнитных вариаций лунным синодическим периодом (29,53 сут) впервые уделяется внимание в работе [210]. Впоследствии появился большой объем исследований, касающихся, в частности, влияния лунного прилива на геомагнитное поле [205, 214, 218, 590-591, 595], кульминацией которых стали автокорреляционные исследования [528], позволившие выделить боковые гармоники вблизи 27-суточной периодичности, связанные с модуляцией лунным приливом. Лишь в нескольких работах предпринимались попытки дать физическое описание влияния фазы Луны на магнитосферу Земли [493, 529], в целом на сегодняшний день вопрос о механизмах воздействия Луны на земную атмосферу остается открытым. Здесь важно отметить, что мнение о модуляции геомагнитных вариаций лунным воздействием многими исследователями не поддерживалось, а боковые гармоники объяснялись модуляциями годовым периодом [280], полугодовым периодом [559-561], 11-летним циклом [594]. Однако, в публикациях последних лет приводятся обоснованные доводы, подтверждающие зависимость величины геомагнитных вариаций от фазы Луны [190, 468]. Одновременно не отрицается и возможность модуляции 27-суточной периодичности более длинными периодичностями, например, годовым периодом [250]. В статье [343] показано, что совместное действие солнечного вращения и лунного прилива (14,77 суток) может приводить к появлению боковых частот, соответствующих периодам 9,55 и 32,61 суток.

В целом, в настоящее время не существует однозначного представления о причинах появления боковых гармоник в спектре 27-суточной периодичности геомагнитного поля. Вероятно, что в спектре могут присутствовать гармоники как связанные с воздействием лунно-солнечного прилива на геомагнитные вариации, так и вызванные модуляцией этих периодичностей большими периодами. Большинство исследований, посвященных анализу причин образования боковых гармоник этой периодичности, выполнены относительно давно, на сегодняшний день можно ожидать, что применение современного спектрального анализа с высоким разрешением по частоте позволит выделить спектральные гармоники, вызванные обоими факторами.

Подведем итог: под влиянием различных процессов в вариациях геомагнитного поля формируются периодичности. В связи с необходимостью установления причин и механизмов таких периодичностей, с учетом многообразия процессов, которые потенциально могут приводить к ним, возникает потребность в продолжении исследований периодичностей в вариациях геомагнитного поля с уделением особого внимания их временной динамике и причинам, вызывающим расщепление 27-суточной и двухнедельной периодичностей.

1.3. Регулярные суточные вариации магнитного поля Земли

Помимо вековых и периодических вариаций, рассмотренных выше, величина магнитного поля варьирует в течение суток, причиной этих суточных геомагнитных вариаций являются внешние источники тока, связанные с процессами магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Солнечно-суточная (Sq) вариация. По наблюдениям за передвижением магнитной стрелки (магнитным склонением) в течение суток в Лондоне А.Ф. Грехем пришел к выводу о том, что магнитное поле Земли претерпевает регулярные суточные изменения [357]. Дальнейшие исследования показали, что в период низкой солнечной активности магнитное поле Земли (спокойные солнечно-суточные (Sq) вариации) плавно изменяется с периодичностью 24 часа [237, 672]. Типичный спектр этой вариации состоит из нескольких гармоник 24-часового периода, соответствующих периодам солнечных приливов, которые представляют собой гармоники с частотами, кратными частоте вращения Земли (24, 12, 8, 6 часов), причем гармоники 8 и 6 часов вызваны действием локальных источников [673].

Исследования на протяжении многих лет показали, что Sq -вариация обусловлена возникновением токовых систем вследствие динамо-эффекта, вызванного воздействием ветров нейтральной атмосферы (солнечные приливные движения и термоприливные движения) на заряженные частицы в E и F_1 -слоях ионосферы [372, 587, 612, 638, 642]. При этом в ионосфере на освещенной Солнцем стороне Земли формируется токовая система, состоящая из двух вихрей: один (ток направлен против часовой стрелки) в северном полушарии; другой (ток направлен по часовой стрелке) в южном полушарии [369, 454]. Существование ионосферных токов подтверждено экспериментально с помощью ракетного зондирования атмосферы [573]. В магнитовозмущенные дни Sq -вариации искажаются, например, вследствие: перестройки и образования новых магнитосферных токовых систем (токи хвоста магнитосферы, частичный кольцевой ток, суббуревый токовый клин, токовый клин при магнитном пересоединении на дневной магнитопаузе); усиления тока Чепмена-Ферраро при сжатии магнитосферы из-за увеличения давления солнечного ветра; образования токов при нагреве авроральной термосферы и т.д. [233, 383, 504].

Результаты многих работ [183, 234, 496, 510, 589, 599] показали, что амплитуда и фаза Sq -вариации не постоянны, а претерпевают изменения от суток к суткам, что можно объяснить изменениями токовой системы в ионосфере [607, 611, 622], обусловленными: во-первых, изменением электропроводимости ионосферы, которая варьируется в зависимости от солнечной радиации, напряженности главного магнитного поля Земли, а также в зависимости от ионосферных условий [606, 610]; во-вторых, изменением величины и конфигурации нейтральных ветров [324, 398, 431]. Sq -вариация на высоких и средних широтах проявляет сезонное поведение с максимумом и минимумом во время локального лета и зимы (годовая вариация) соответственно, а также увеличение в периоды равноденствий [272, 520, 669, 671]. В экваториальной области суточная вариация характеризуется максимумом во время равноденствий [374, 496, 500, 552]. Исследования позволили выявить, что кроме проявления сезонной зависимости Sq -вариация варьирует в зависимости от фазы солнечного цикла [197, 242, 248, 608, 672] и от долготы [237, 244, 515].

Анализ суточных вариаций магнитного поля в приповерхностном слое Земли показал, что Sq -вариация обусловлена не только ионосферными, но также вторичными токами, индуцированными в недрах Земли на глубине около 100 – 600 км [554], причем

их сила по величине составляет примерно одну треть от ионосферных токов [453]. Индуцированные токи обычно имеют обратное направление относительно ионосферных токов, и, следовательно, они вызывают уменьшение Sq -вариаций в вертикальной составляющей и увеличение Sq -вариаций в горизонтальной составляющей. Кроме эффекта электромагнитной индукции в верхней мантии значительное влияние на Sq -вариации оказывают электрические токи, индуцированные в проводящих водоемах, особенно вблизи побережья [415, 422, 550, 609].

Лунно-суточная (L) вариация. Влияние положения Луны на суточные вариации геомагнитного поля впервые установлено К. Крейлем на основе данных измерений склонения в Праге и в Милане [414]. Позднее это нашло подтверждение в работах других исследователей [252-253, 548, 635, 672]. Были выделены периодичности геомагнитных вариаций с периодами, совпадающими с периодами лунных приливных волн (M_2 , N_2 , O_1 , K_1) [199, 588, 613, 665]. Развитие спектральных методов и компьютерных технологий позволило выявить в спектре геомагнитных вариаций, зарегистрированных на прибрежной обсерватории Гонолулу, спектральные гармоники, которые возникают из солнечных и лунных приливов и интермодуляций между ними [433].

В ходе исследований механизма генерации лунно-суточной вариации установлено, что в отличие от солнечных приливов, которые главным образом термически возбуждаются солнечным нагревом, атмосферные лунные приливы вызываются гравитационным притяжением Луны (движение твердой земли и океанов и перераспределение массы Земли/океана), воздействующим на атмосферу Земли [378, 465]. Как и в случае солнечно-суточной вариации, под воздействием гравитационного прилива со стороны Луны, возбуждается L -токовая система [440, 453]. Последующие работы показали, что фокус этой токовой системы обычно находится на более низкой широте, чем фокус Sq -токовой системы [200, 566]. L -вариация не зависит от солнечной активности [247, 444,], но характеризуется сезонным изменением [290].

Здесь стоит упомянуть, что вопрос об амплитудной и фазовой модуляции геомагнитных вариаций в околосуточном и полусуточном диапазоне рассматривается лишь в нескольких работах [220, 297].

Рассмотренные выше результаты известных исследований показывают, что формирование регулярной суточной вариации обусловлено воздействием лунно-

солнечного прилива и зависит от многих факторов (например, сезон, солнечная активность), которые в большой степени зависят от места наблюдений.

Для того чтобы более четко представлять, какие процессы и как формируют суточные изменения в условиях средних широт, их различия в зависимости от сезона, необходимо провести анализ морфологических особенностей этой вариации в разных регионах Земли, в частности, в европейском секторе. Представляется важным дальнейшее исследование практически непроработанного вопроса модуляции геомагнитных вариаций в околосуточном и полусуточном диапазонах периодов, поскольку гармоника в спектрах этих диапазонов могут быть вызваны комбинацией двух факторов: приливного воздействия со стороны системы Луна – Солнце и модуляцией. Такое исследование позволит улучшить понимание динамики атмосферы и взаимодействий в системе нейтральная атмосфера – ионосфера – магнитосфера.

1.4. Геомагнитная активность и ее связь с солнечной активностью

На фоне регулярных суточных вариаций геомагнитного поля иногда наблюдаются нерегулярные возмущения магнитного поля Земли (геомагнитная активность), обусловленные: изменением магнитосферно-ионосферной токовой системы вследствие воздействия потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменениями внутри магнитосферы, взаимодействием магнитосферы и ионосферы [385]. На средних широтах геомагнитная активность чувствительна как к авроральным явлениям (высыпание частиц, суббури и полярные сияния), наблюдаемым в начале активности аврорального электроджета, так и к вариациям экваториального кольцевого тока (источник геомагнитных бурь) [427].

Геомагнитные индексы. Степень возмущенности геомагнитного поля, главным образом, оценивают по геомагнитным индексам [65, 459, 469], например, для характеристики локальной геомагнитной активности можно использовать K -индекс (локальный трёхчасовой индекс), ap -индекс (трехчасовой индекс "эквивалентной амплитуды" локальной геомагнитной активности), A_p -индекс (суточный индекс "эквивалентной амплитуды" локальной геомагнитной активности); для характеристики геомагнитной активности в целом на Земле можно использовать: ΣK_p -индекс (планетарный суточный индекс), K_p -индекс (планетарный трёхчасовой индекс), aa -индекс (индекс антиподальной амплитуды); для характеристики отдельных источников

геомагнитного поля часто привлекают: *Dst*-индекс (индекс экваториального магнитного возмущения), высокоширотные индексы: *AU*, *AL*, *AE* и *AO* (индексы аврорального электроджета), *ASY* и *SYM* индексы (индексы возмущений в средних широтах) и т.д. Геомагнитные индексы нашли широкое применение при решении многих задач геомагнетизма, включая исследования верхней атмосферы и межпланетного пространства, а также для улучшения качества магнитных данных при исследованиях глубинных слоев и ядра Земли [385].

В качестве характеристики изменения степени нерегулярной геомагнитной активности в течение определенного дня в конкретном регионе чаще всего используется "локальный" *K*-индекс [206, 209]. *K*-индекс представляет собой квазилогарифмический индекс, характеризующий в 3-х часовом промежутке времени нерегулярную геомагнитную активность относительно регулярной активности "спокойного дня". В связи с этим при вычислении индекса необходимо удалить все вариации, которые не связаны с нерегулярными возмущениями магнитного поля Земли, например, спокойные солнечно-суточные (*Sq*) и лунно-суточные (*L*) вариации, рассмотренные в разделе 1.3. Каждому 3-часовому промежутку времени по Гринвичу (0 – 3, 3 – 6 и т.д.) ставится в соответствие значение *K*-индекса от 0 до 9 согласно шкале, которая на основе распределения магнитной активности позволяет перевести измеренные значения магнитного поля в 10 классов (от 0 до 9) [65, 209]. В качестве стандарта, по которому откалибровываются другие обсерватории выступает обсерватория Нимегк (Германия), где впервые был вычислен *K*-индекс. Нижний предел для $K = 9$ и другие промежуточные значения для каждой обсерватории выбираются так, чтобы наблюдаемые значения *K* - индекса в любом конкретном регионе соответствовали значениям, полученным на Нимегке [535].

Привлечение индексов позволяет установить статистику геомагнитных возмущений разной силы [10], кроме того, дает возможность оценить в целом динамику геомагнитных вариаций. Примером такой оценки служат приведенные в разделе 1.2. периодичности, определенные по геомагнитным индексам.

Связь между солнечной и геомагнитной активностью. Привлечение разных параметров, характеризующих солнечную и геомагнитную активность, показало наличие сильной корреляционной зависимости между ними [304, 331, 549, 580]. Поскольку геомагнитная активность формируется под влиянием источников разной

природы, связь между солнечной и геомагнитной активностью не линейна [330, 426]. Установленное в работах [33, 307, 347, 460] снижение корреляции между геомагнитной и солнечной активностью в 11-летнем солнечном цикле, начиная с конца XIX в. можно объяснить квазипериодическими флуктуациями временного лага (сдвига по времени) вариаций геомагнитной активности относительно изменений числа солнечных пятен [404] или двумя максимумами геомагнитной активности (предполагается увеличение второго максимума, связанного с высокоскоростными потоками солнечного ветра, относительно первого, связанного с солнечными пятнами (выбросы корональной массы)) [227, 307, 569]. Кроме того, увеличение геомагнитной активности в XX в. может быть обусловлено специфическими гелиосферными условиями на расстоянии 1 а.е. [586].

Геомагнитная активность формируется в результате изменений существующих магнитосферно-ионосферных токовых систем или в результате образования новых токовых систем (кольцевой ток и авроральная электроструя) при взаимодействии магнитосферы Земли с солнечным ветром [133, 302, 427, 631]. Исследования показали, что наблюдается связь между южной компонентой межпланетного магнитного поля (возникновение которой зависит от направления общего магнитного поля Солнца и от секторной структуры межпланетного магнитного поля), потоками солнечного ветра и повторяющимися сильными возмущениями геомагнитного поля [179, 289, 342, 562, 632, 650]. Чаще всего вариации геомагнитной активности в 11-летнем цикле солнечных пятен характеризуются двумя максимумами: первый наблюдается во время максимума солнечной активности, а второй – во время фазы спада солнечной активности [307-308, 523], причем эти максимумы больше для четных циклов солнечной активности [367, 411]. В ряде работ [62, 275, 567] предпринимается попытка определения связи между длиннопериодными вариациями геомагнитной активности и 22-летним циклом Хейла, однако, абсолютной ясности в этой проблеме пока достичь не удастся.

Исследования последних лет [40, 531, 544, 630] показали, что геомагнитная активность на протяжении 23-его солнечного цикла была исключительно низкой и была синфазна солнечной активности, что связано с необычными условиями солнечного ветра, в частности, с низкой интенсивностью магнитных полей и низкой скоростью ветра.

Геомагнитная активность обусловлена двумя основными источниками солнечной энергии [110, 307, 331, 427-428, 532-533, 640], причем, какой из них оказывает преимущественное воздействие, зависит от фазы солнечного цикла. Первый источник связан с переходными явлениями, такими как солнечные вспышки, извержения протуберанцев и выбросы корональной массы, и является доминирующим на фазе развития солнечной активности [352, 530]. Второй источник связан с рекуррентными явлениями (высокоскоростными потоками солнечного ветра) и имеет тенденцию к максимуму на фазе спада или на минимуме солнечного цикла [427, 563, 629, 631, 640]. В последние годы цикла геомагнитная активность возникает, в основном, в результате повторяющихся бурь, воздействия быстрых солнечных ветров и образования корональных дыр [428]. Большой вклад в среднегодовую геомагнитную активность вносится рекуррентными явлениями, вызванными высокоскоростными потоками солнечного ветра из долгоживущих солнечных корональных дыр, а не сильными, но редкими и кратковременными, одиночными бурями, обусловленными выбросом коронарной солнечной массы, спровоцированным солнечными пятнами [354, 485, 532, 659-660].

Подведем итог: Уровень геомагнитной активности, как в локальном и региональном, так и планетарном масштабе, описывается индексами геомагнитной активности. В качестве характеристики степени возмущенности геомагнитного поля в конкретном регионе чаще всего используется "локальный" *K*-индекс. Хорошо известна связь между геомагнитной и солнечной активностью, причем она различается в зависимости от номера и фазы солнечного цикла. Следует отметить, что до настоящего времени не удастся получить точные выражения для описания этой взаимосвязи, а также определить временную задержку между событиями на Солнце и эффектами в приземной атмосфере, что объясняется отсутствием достоверных достаточно длинных рядов данных. Особый интерес представляет изучение связи между солнечной активностью и ее эффектами в геомагнитном поле для текущего 24-ого цикла солнечной активности, который начался примерно в январе 2009 г., в связи с тем, что он характеризуется необычайно низкой солнечной активностью ("глубокий минимум") [395, 463, 656]. Следует ожидать, что в силу этих обстоятельств зависимость между солнечной и геомагнитной активностью будет существенно отличаться от полученных для других циклов солнечных пятен. Для изучения взаимосвязи в условиях слабой

активности 24-ого цикла необходимо провести анализ вариаций геомагнитной активности, в частности локальной, в сопоставлении с параметрами солнечной активности.

1.5. Магнитотеллурические передаточные функции и методы их оценки

Магнитное поле Земли характеризуется как иррегулярными, так и квазипериодическими вариациями, связанными с возмущающим влиянием внутренних и внешних источников. Временные геомагнитные вариации содержат информацию об изменении электрических характеристик приповерхностных участков земной коры, таких как электропроводность.

Магнитотеллурические передаточные функции. Электропроводность земной коры на основе записи вариаций магнитного поля впервые оценена в работе [557]. Основой для введения магнитотеллурических (МТ) передаточных функций послужило предположение о взаимосвязи между вариациями теллурических токов и геомагнитной активностью [254]. Впоследствии, рассмотрев фазовые соотношения между наблюдаемыми вариациями электрического и магнитного полей на поверхности Земли, различные исследователи в начале 50-х годов (А.Н. Тихонов, Н.В. Липская в СССР, Ю. Като, Т. Кикучи и Т. Рикитакэ в Японии) открыли электромагнитную природу магнитотеллурического поля. Фундаментальная теория магнитотеллурического поля в горизонтально слоистой Земле была изложена в статье [235]. Однако, предположение Каньярда-Тихонова о плоском источнике волн было поставлено под сомнение в статьях [524, 647], где утверждается, что результаты Каньярда-Тихонова для слоистой земли действительны только в том случае, если сами поля в земле не изменяются заметно на толщине скин-слоя (поле должно быть однородным на большой площади). Тем не менее, при помощи компьютерного моделирования [439] было установлено, что для реальных профилей проводимости земли предположение о плоской волне остается в силе для периодов выше 10^3 с; в средних широтах оно действительно даже для периодов до 10^5 с [309, 585].

В магнитотеллурическом анализе, предложенном А.Н.Тихоновым и Л.Каньярдом, профиль удельного сопротивления однородной стратифицированной модели земли определяется из отношения тангенциальных составляющих естественных электрического и магнитного полей на поверхности Земли, т.е. используется скалярное

представление импеданса: $Z = E_x / B_y$ ($Z = E_y / B_x$), где E_x , E_y , B_x и B_y – комплексные амплитуды соответствующих компонент электромагнитного поля. Однако, последующие исследования продемонстрировали, что использование разных пар ортогональных составляющих электромагнитного поля и расчеты, выполненные в разные дни, дают существенно расходящиеся результаты [584], что может быть, хотя бы частично, обусловлено наличием двумерных неоднородностей в земной коре и / или ее анизотропии, а также случайной поляризацией магнитотеллурического поля. Этих затруднений удалось избежать простой заменой скалярного представления тензорными соотношениями второго порядка между магнитным и электрическим полями:

тензор проводимости [228]:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{xx} & Y_{yx} \\ Y_{yx} & Y_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

или тензор импеданса [22, 124, 167]:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{yx} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix}.$$

Для горизонтально-слоистой среды диагональные элементы Z_{xx} и Z_{yy} равны нулю. В работе [228] показано, что тензор проводимости можно повернуть, чтобы минимизировать диагональные элементы, и таким образом приблизить его, насколько это возможно, к скалярному представлению.

Комплексный тензор импеданса (действительная и мнимая части) можно интерпретировать через его магнитуду (кажущееся удельное сопротивление) и фазу

$$(ij = xx, xy, yx, yy): \rho_a^{ij}(\omega) = \frac{\mu}{\omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \text{ и } \varphi_{ij}(\omega) = \arctan \frac{\text{Im } Z_{ij}(\omega)}{\text{Re } Z_{ij}(\omega)}.$$

Кажущееся сопротивление ρ_a представляет собой среднее удельное сопротивление в объеме приповерхностного слоя на определенной частоте, а фаза импеданса φ описывает разность фаз между электрическим и магнитным полями и предоставляет дополнительную информацию об удельном сопротивлении [570].

Аномальная индуцированная вертикальная составляющая магнитного поля линейно связана с горизонтально индуцирующими магнитными полями через комплексный вектор – магнитный типпер $\mathbf{T}(\omega)$ [26, 646]:

$$B_z(\omega) = [T_x(\omega) T_y(\omega)] \begin{bmatrix} B_x(\omega) \\ B_y(\omega) \end{bmatrix}.$$

Соотношение между горизонтальными и вертикальной компонентами магнитного поля наиболее чувствительно к латеральным изменениям проводимости (когда возникает горизонтальная составляющая в многомерной земле или на границе океан-суша). Эффект увеличения вертикального магнитного поля вблизи побережья ("береговой эффект"), связанный с увеличенным теллурическим полем на суше, направленным к побережью [94, 512], объясняется латеральным контрастом проводимости между проводящими океанами и океанической мантией и более резистивными континентами.

Действительная и мнимая части индукционных векторов определяются по компонентам магнитного типпера следующим образом:

$$\operatorname{Re} T = \operatorname{Re} T_x i + \operatorname{Re} T_y j,$$

$$\operatorname{Im} T = \operatorname{Im} T_x i + \operatorname{Im} T_y j.$$

Действительные части индукционных векторов обладают важным свойством: в обозначениях Визе они направлены от хорошего проводника, а в обозначениях Паркинсона они направлены на хороший проводник.

Магнитуда $|\operatorname{Re} T|$ и фаза $(\operatorname{Re} T)_\vartheta$ действительных частей вектора Паркинсона определяются следующим образом: $|\operatorname{Re} T| = \sqrt{|\operatorname{Re} T_x|^2 + |\operatorname{Re} T_y|^2}$, $(\operatorname{Re} T)_\vartheta = \arctan \frac{\operatorname{Re} T_y}{\operatorname{Re} T_x}$.

Аналогично определяются магнитуда и фаза мнимых частей этого вектора. Магнитуда магнитного типпера задается выражением: $|T| = \sqrt{|T_x|^2 + |T_y|^2}$.

В случае одномерной модели земли нет индуцированных токов в вертикальном направлении, поэтому $|T| = 0$. В случае двумерных моделей земли поворот системы координат, так чтобы ось x была направлена по простиранию неоднородности, позволяет минимизировать B_x и, следовательно, минимизировать $|T_x|$, что, в свою очередь, ведет к максимизации $|T_y|$. Использование поворота системы позволяет избавиться от двусмысленного расхождения в 90° .

Магнитный типпер часто графически иллюстрируется с помощью индукционных векторов (вектор Паркинсона, индукционная стрелка Визе), служащих для характеристики направлений латеральных проводящих аномалий.

На основе предположения, что имеет место линейное соотношение между электрическими полями (или магнитными полями), измеренными в двух разных местах, был введен теллурический тензор (или магнитный тензор) [23, 35, 553]:

$$\begin{bmatrix} \widehat{E}_x \\ \widehat{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{yx} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} \widehat{B}_x \\ \widehat{B}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{xx} & m_{yx} \\ m_{yx} & m_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix}.$$

По аналогии с магнитным типпером можно определить магнитуды и фазы основных (m_{xx} и m_{yy}) и дополнительных компонент магнитного тензора (m_{xy} и m_{yx}). Магнитуда магнитного тензора определяется как:

$$|M| = \sqrt{|m_{xx}|^2 + |m_{yy}|^2 + |m_{yx}|^2 + |m_{xy}|^2}.$$

Магнитуда магнитного тензора инвариантна относительно поворота системы (xy) вокруг оси z . В случае горизонтально однородной Земли $|M| = \sqrt{2}$, зоны с $|M| > \sqrt{2}$ коррелируют со структурами более низкого сопротивления, а зоны с $|M| < \sqrt{2}$ коррелируют со структурами более высокого сопротивления.

В более общем виде, соотношения, приведенные выше, могут быть описаны следующим выражением:

$$X = Y_1 Z_1 + Y_2 Z_2,$$

где X – входной канал, Y_1 и Y_2 – выходные каналы, Z_1 и Z_2 – функции отклика линейной системы.

Магнитотеллурические передаточные функции (магнитный типпер, магнитный тензор), вычисленные с привлечением только данных геомагнитного поля, также называют магнитовариационными параметрами [25].

Методы оценки магнитотеллурических функций. Первый метод, разработанный для оценки магнитотеллурических функций, основан на применении преобразования Фурье к временным рядам и последующем применении метода наименьших квадратов, который используется для подгонки магнитотеллурических соотношений в частотной области [572]. Этот подход основан на нескольких предположениях: падающая волна

представляет собой плоскую волну, т.е. магнитотеллурические геомагнитные источники расположены далеко от места измерений; привлекаемые при расчете временные ряды считаются стационарными; шум в электромагнитном поле является гауссовским. Очевидно, что эти условия не всегда возможно выполнить строго.

Основным препятствием для правильной оценки магнитотеллурических функций является наличие шумов в данных: инструментальный шум (например, шум датчика из-за температурной зависимости магнитометров или электрохимических процессов на теллурических электродах [393, 519] и неисправностей в аналоговых или цифровых записывающих устройствах); шум окружающей среды (например, влияние погодных условий, микросейсмической активности [489], полярных сияний [339, 556], магнитные источники в средних широтах (особенно геомагнитные пульсации $Pc3$) [316], биологический шум, который может возникнуть в результате электрохимических процессов в растениях [476] и океанический шум, связанный с движением морской воды в магнитном поле Земли [420]); антропогенный или индустриальный шум (источниками такого шума являются все устройства, потребляющие электроэнергию, например электрифицированные железные дороги [394, 484, 508], районы добычи полезных ископаемых [187], электрические заборы, радио и телевизионные передатчики, сеть электроснабжения [604]) и т.д. В густонаселенных районах индустриальный шум очень часто поляризован и превышает естественный сигнал в несколько раз. Наличие шумов разной природы приводит к тому, что оцененные магнитотеллурические функции смещаются относительно истинных.

Возможный способ удалить или уменьшить ошибку смещения передаточных функций из-за наличия шумов – это привлечение коррелированных временных рядов, полученных в другом пункте наблюдений, для характеристики и / или удаления влияния шума (метод удаленной ссылки [338, 355-356] или метод множественной удаленной ссылки [312]). Эти методы заключаются в одновременной записи полей в двух или более пунктах наблюдений, которые удалены друг от друга так, что источники шума в разных пунктах не коррелируют. Если локальные и удаленные данные загрязнены одним и тем же шумом, то метод удаленной ссылки может привести к ошибочным результатам [537]. При выполнении для пунктов наблюдений условий, что источники шума некоррелированы, эти методы эффективны для устранения смещения, вызванного некоррелированным шумом. Однако, если существуют необычные

источники шума (сложные природные источники или индустриальный шум) и полосы частот (МТ "мертвые зоны"), то метод удаленной ссылки может дать сбой. Без привлечения данных с другого пункта наблюдений достаточно хорошие результаты по нивелированию смещения оценки получены в работе [477] на основе предположений о малости дополнительных компонент тензора по сравнению с основными и о линейной зависимости между значением переоценки значений магнитотеллурических функций и уровнем шума во входных каналах.

При разделении полезного сигнала и шумовой помехи чаще всего используется предварительный скрининг данных в соответствии с выбранными свойствами и граничными значениями [340, 449, 661]. Например, в работах [417, 627] представлен скрининг данных на основе когерентности данных в сегментах, исключая те, для которых когерентность ниже порогового значения перед применением робастного метода. Тем не менее, есть примеры [258], когда этот подход терпит неудачу, и, следовательно, его следует применять с осторожностью.

Проблемы, вызванные нестационарностью временных рядов, могут быть решены путем разделения временных рядов на небольшие сегменты и оценки передаточных функций для каждого сегмента с последующим усреднением, примером таких методов являются робастные методы [261-262, 314, 423, 597]. Приведенное в статье [392], сопоставление методов иллюстрирует уточнение оценки, обусловленное использованием робастных методов обработки данных. Однако, и робастные методы все же могут давать ошибочные результаты, если в течение большей части времени записи присутствует сильно коррелированный шум [204]. Преодолеть искажение оценок магнитотеллурических функций из-за нестационарности также позволяет применение частотно-временного распределения [251], преобразования Гильберта-Хуанга [236], разложения сингулярных значений [511].

Исследования [315] показали важность идентификации и удаления выбросов в данных при оценке передаточных функций. Робастные методы при оценке функций отклика позволяют хорошо удалять шумы из данных выходного канала, однако, они почти совсем не чувствительны к шуму и выбросам во входном канале, в частности, к точкам рычага [260]. В связи с этим оценки магнитотеллурических передаточных функций в "мертвой зоне" от 5 Гц до 0,05 Гц часто сильно искажены [311]. Предложенный в работах [259-260] метод, основанный на проектируемой матрице,

позволяет минимизировать влияние экстремальных данных входного канала, которые не дают большие остаточные члены, и, следовательно, могут быть пропущены робастными оценочными функциями.

Важной вехой развития методов оценки магнитотеллурических передаточных функций стало развитие гибридных подходов. Один из первых таких методов – метод разделения сигнала и шума, в котором помимо робастной обработки используются данные, полученные на другом участке, что обеспечивает возможность разделения коррелированных и некоррелированных шумов и сигнала магнитотеллурического происхождения [421]. Впоследствии метод разделения сигнала и шума был расширен привлечением данных еще с одного пункта наблюдений [313] или с нескольких пунктов [320, 498]. Гибридный алгоритм с привлечением разных подходов для улучшения оценки передаточных функций и данных с четырех участков, предложенный в недавней публикации [61], позволяет эффективно отделить шумовую помеху от полезного сигнала.

В настоящее время разрабатываются подходы для оценки магнитотеллурических функций с привлечением вейвлет-преобразования [598]. В работах [341, 626] авторы используют вейвлет-преобразование для фильтрации данных в частотно-временной области перед использованием робастного метода оценки. Вейвлет-анализ также применяется при изучении поляризационных свойств промышленных источников шума [322]. Проведение непрерывного вейвлет-преобразования позволяет уменьшить влияние шума при переходных геомагнитных событиях, таких как геомагнитные пульсации и атмосферерики [419].

Другим ключевым компонентом обработки, который так же важен, как и оценка передаточных функций, является вычисление их доверительных пределов. Обычные оценки ошибок на основе распределения часто смещены [258] и не могут обеспечить надежные оценки магнитотеллурических функций. Для решения этой проблемы стандартную дисперсию заменили на дисперсию по методу расщепления выборки [261, 618]. Вопрос об устойчивости оценок магнитотеллурических функций и связанных с ними ошибок обсуждался в работе [317]. Показано, что ошибки дисперсии по методу расщепления выборки недостоверно оценивают изменчивость последовательных оценок во всем диапазоне МТ частот. В опубликованной недавно статье [366] утверждается, что отклонения от предположения о плоской волне, используемые при оценке

магнитотеллурических функций, приводят к ошибкам в оценках, которые не будут учтены в стандартных доверительных интервалах ошибок. Введение нового типа оценки ошибок, тензора ошибок, [658] вызвало серьезную полемику в научном сообществе [256, 657]. Нельзя сказать, что такой способ оценки ошибки на сегодняшний день окончательно одобрен научным сообществом.

Временные вариации магнитотеллурических функций. Величина магнитотеллурических функций, в частности, магнитовариационных параметров, не постоянна во времени. В ходе исследования закономерностей временных вариаций магнитотеллурических функций было установлено, что одним из существенных факторов, вызывающих изменения величины передаточных функций во времени, является сейсмическая активность [266, 337, 349, 488]. В связи с этим, например, представляют интерес выявленные при анализе данных обсерватории Какиока (Япония) сезонные вариации магнитного типпера, обусловленные годовой вариацией электропроводности Земли, и всплеск значений магнитного типпера [565], который авторы современных публикаций [538, 540] связывают с землетрясением Тохоку.

Анализ магнитного типпера по данным геомагнитных обсерваторий, расположенных на различных широтах, позволил выявить суточные, месячные, полугодовые и годовые периодичности [83, 99-101, 103-104, 135, 539], а также 11-летнюю периодичность [12, 14]. Что касается интенсивности таких вариаций, например, авторы статьи [13] отмечают, что они наиболее интенсивны на высоких широтах и в приэкваториальной зоне, в средних широтах они минимальны.

Влияние подземных флюидов на магнитотеллурические функции. Водонасыщенные породы обычно имеют более низкое удельное сопротивление по сравнению с сухими породами, степень изменения удельного сопротивления зависит от количества флюида, его температуры и степени минерализации [583]. Оценки, сделанные в работе [34], показывают, что при наличии десятых долей процента флюида в каналах горной породы ее сопротивление уменьшается на порядок.

Поскольку магнитотеллурические функции отражают изменение электропроводности среды и чувствительны к контрастности электрической проводимости на глубине, в том числе к наличию электропроводящих флюидов в горных породах, то следует ожидать, что изменение концентрации флюидов в земной коре проявится в изменении величины магнитотеллурических функций [570]. Это,

например, подтверждается исследованиями вблизи вулкана Сакураджима (Японии) [188], а также в районе озера Байкал и на Камчатке [96, 99, 101, 104]. В частности, высказывается предположение о том, что годовые вариации магнитного типпера связаны с изменением электропроводности разломов, вызванным изменением трещиноватости литосферы, степени насыщенности флюидами из-за обращения Земли вокруг Солнца [96, 99, 101, 104]. Результаты численного моделирования, приведенные в работах [213, 513], демонстрируют, что наблюдается отклик магнитотеллурических функций на изменение подповерхностной проводимости при закачке флюида.

Успешное применение в настоящее время методов магнитотеллурики при геотермальной разведке [201, 368, 391, 486, 507, 644, 680], при оценке уровня подземных вод [186] и концентрации флюидов в литосфере [558, 668] доказывает возможность определения по временным вариациям магнитотеллурических функций степени обводненности горных пород.

Резюмируя, следует отметить, что по данным регистрации электромагнитного поля в приземном слое с помощью магнитотеллурических функций (или магнитовариационных параметров в случае регистрации только магнитного поля) можно получить информацию об электропроводности земной коры, ее глубинном и латеральном распределении, а также об изменении этих характеристик со временем. Для оценки магнитотеллурических функций и ее достоверности разработано много подходов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. При выборе метода необходимо учитывать цели исследований, а также конкретные факторы, такие как: локальные электромагнитные шумы, особенности гидрогеологического строения региона.

Исследования последних лет продемонстрировали, что помимо годовых вариаций в поведении магнитотеллурических функций наблюдаются другие закономерности их временных изменений. В целом, вопрос о временной динамике магнитотеллурических функций, в частности магнитовариационных параметров, остается открытым и требует проведения дальнейших исследований. Один из факторов, оказывающих существенное влияние на величину магнитотеллурических функций, – это изменение концентрации флюида в земной коре. Можно предположить, что изменение режима подземных вод существенно отразится в вариациях магнитотеллурических функций. В связи с этим представляет значительный интерес определение связи между магнитовариационными

параметрами, отражающими изменение электропроводности среды, и изменением уровня подземных вод безнапорного горизонта.

1.6. Влияние солнечной и геомагнитной активности на геодинамические процессы

Приземный слой атмосферы и приповерхностные участки земной коры вместе представляют собой единую, целостную самоорганизованную геофизическую систему, функционирование и направленность развития которой определяются взаимовлиянием геодинамических процессов, протекающих в твердой геосфере, и геофизических процессов в атмосфере. В этом ключе, можно ожидать наличие взаимосвязи между сильными вариациями магнитного поля Земли, вызванными солнечной активностью, и сейсмотектоническими процессами.

Влияние солнечной активности на сейсмичность. Вопрос о возможном влиянии сильных возмущений геомагнитного поля, вызванных солнечной активностью, на геодинамические процессы начал активно изучаться только в 60-ые годы XX века, несмотря на то, что еще в 1853 г. Р. Вольф сделал предположение о том, что число солнечных пятен может оказывать влияние на частоту возникновения землетрясений [666].

Существенные результаты были получены в одной из первых работ [571], в которой выявлена отрицательная корреляция между глобальной сейсмичностью и числом солнечных пятен. Много материала о влиянии солнечной активности на сейсмичность представлено в цикле публикаций А.Ф. Сытинского [154-160], где показано, что наблюдается вполне определенная зависимость общей сейсмичности Земли и сейсмичности отдельных регионов от фазы цикла солнечной активности: в зонах сжатия сейсмическая активность повышается в периоды повышения солнечной активности и, наоборот, в зонах растяжения снижается (в частности, для Курило-Камчатской зоны, регионов Средней Азии и Казахстана). Результаты многочисленных исследований позволили получить серьезные аргументы в пользу наличия связи между параметрами солнечной активности и глобальной сейсмической активностью Земли [21, 63, 112, 137, 177, 268, 403, 497, 614] и отдельных регионов, в частности, Средиземноморской зоны [346, 462], Китая и Западной Монголии [365], Камчатского региона [28, 136], Ирана, Японии и США [491-492, 605], Новой Зеландии [490]. В зависимости от силы землетрясений максимум числа землетрясений будет наблюдаться

в разные фазы 11-летнего цикла солнечной активности [16]. В целом следует отметить, что результаты исследований, не дают однозначной оценки особенностей распределения сейсмичности в пределах 11-летнего цикла солнечной активности.

Дополнительным подтверждением связи между сейсмической активностью и солнечной активностью служат результаты спектрального анализа [400], свидетельствующие о том, что в спектре землетрясений с $M \geq 7$ и в спектре чисел Вольфа основной гармоникой является гармоника $\sim 10 - 11$ лет. В нескольких работах [15, 178] отмечается, что на возникновение сильных землетрясений помимо 11-летнего цикла оказывает влияние 22-летний солнечный цикл Хэйла.

Статистическая значимость возможной корреляции между солнечными пятнами и сейсмичностью иногда подвергалась сомнению [80, 467], и для некоторых регионов фактически было показано, что корреляция между солнечной активностью и сейсмичностью незначительна, в частности, для Калифорнии [592].

Связь геомагнитных вариаций с сейсмической активностью. Изучение вопроса о связи возмущений магнитного поля с сейсмической активностью основано, главным образом, на исследовании магнитных возмущений, приуроченных к сейсмическим событиям. В целом, возникновению землетрясений предшествует образование в магнитном поле волн сверхнизких частот (УНЧ, менее 1 Гц) [54, 371, 408, 370]. Были обнаружены магнитные возмущения, приуроченные к крупным землетрясениям, таким как землетрясение в Сан-Франциско (18.04.1906) [211]; Спитакское землетрясение (7.12.1988) [406, 475]; Суматра-Андаманское землетрясение (26.12.2004) [143]; землетрясение Тохоку (Япония) (11.03.2011) [499, 670] и другие. Результаты работ [246, 593] свидетельствуют о росте плотности протонов солнечного ветра и увеличении K_p -индекса, предшествующих сейсмическим событиям большой интенсивности (магнитудой больше 6), в частности, Японскому землетрясению с магнитудой 7.0, произошедшему 15.04.2016. Стоит отметить, что в последнее время в некоторых публикациях высказываются сомнения относительно обнаружения предвестников землетрясений в магнитном поле Земли [239, 451, 617].

Анализ связи между геомагнитными возмущениями и землетрясениями в зоне Вранча в Румынии (зона концентрации сейсмичности) за период 1988 – 1996 гг. показал, что землетрясения приурочены к резким изменениям в вертикальной компоненте геомагнитного поля, причем время запаздывания момента возникновения землетрясения

зависит от глубины очага землетрясения [20]. В отдельных работах отмечается корреляция глобальной сейсмичности со спокойной солнечно-суточной (Sq -) вариацией магнитного поля Земли [306, 526], а также с вековым ходом геомагнитного поля [113, 118, 564].

Ряд исследователей уделяет особое внимание вопросам взаимосвязи геомагнитных бурь и тектонических событий. Отмечается, что в период весеннего и осеннего равноденствий, когда увеличивается число магнитных бурь, повышается частота землетрясений [18, 154, 160]. На основе анализа регионального сейсмического каталога Казахстана и Кыргызстана выявлена [66-67, 145, 147] значимая корреляция между магнитными бурями и сейсмичностью, а также то, что сейсмический отклик на магнитные бури длится в течение 10 дней с максимальным эффектом от 2 до 7 суток после внезапного начала. Результаты, представленные в статье [55], свидетельствуют о том, что во время магнитных бурь отмечается уменьшение глобальной сейсмичности. Однако, в отдельных случаях, например, для Анатолийского полуострова [676] и Гармского района Таджикистана [58] связь между магнитными бурями и сейсмичностью не была установлена.

Влияние геомагнитной активности на микросейсмический фон. В нескольких публикациях обсуждается вопрос о влиянии геомагнитной активности, в частности, магнитных бурь, на сейсмический фон. В большинстве случаев непосредственно за сильным геомагнитным возмущением в атмосфере (магнитная буря), либо с некоторой задержкой, отмечается увеличение среднеквадратичного отклонения амплитуды сейсмического фона от текущих значений [121, 163-164]. При этом принципиально важную роль в эффекте возникновения отклика микросейсмического фона на геомагнитные вариации играет амплитуда магнитного импульса и скорость изменения магнитного поля. В работе [138] рассматривается возможность модуляции суточной вариации сейсмического фона суточным изменением магнитного поля Земли. Тем не менее, по итогам отдельных исследований, например [57], наличие связи между фоновыми геомагнитными вариациями и амплитудными вариациями сейсмического фона не подтвердилось.

Возможные механизмы влияния солнечной и геомагнитной активности на геодинамические процессы. По результатам ряда исследований возможного механизма влияния солнечной и геомагнитной активности на возникновение сильных

землетрясений [198, 571, 636, 675] предполагается, что солнечная активность может оказывать триггерное воздействие на геодинамические процессы. В частности, солнечная активность (увеличение числа солнечных пятен), влияя на теллурические токи, может выступать в качестве триггерного механизма разрядки напряжений в недрах Земли [571]. Тем не менее, такая связь не всегда прослеживается, например, в работе [435] приводятся доказательства невозможности триггерного влияния солнечной активности на глобальную сейсмичность.

Один из механизмов воздействия солнечной и геомагнитной активности на геодинамические процессы связывают с увеличением потенциальной энергии атмосферы при увеличении корпускулярного излучения Солнца, когда активная область проходит через центральный меридиан, что ослабляет зональную циркуляцию, а также приводит к локальному накоплению энергии [11, 154, 160]. Предполагается, что перераспределение атмосферных масс по всему земному шару в значительной мере нарушает баланс формы Земли (магнитосфера иногда сокращается на четыре радиуса Земли) и приводит к смещениям блоков земной коры, вызывая концентрацию напряжений на отдельных участках [614]. Землетрясения являются следствием этих процессов. Практически во всех рассмотренных А.Д. Сытинским случаях отмечается небольшая задержка (в большинстве случаев, она составляет 2 – 3 суток) между прохождением активной области через центральный солнечный меридиан и началом землетрясения [154-160]. В качестве другого механизма рассматривается возникновение вихревых электрических токов вдоль разломных зон, вызванных сильными магнитными бурями, в результате чего происходят нагрев горных пород и снижение их сопротивления сдвигу [365]. Замечено, что землетрясения чаще случаются тогда, когда уровень солнечной активности быстро и резко меняется. При солнечной вспышке во много раз возрастает излучение, которое, взаимодействуя с магнитосферой Земли, вызывает ее возмущение – магнитную бурю. В качестве альтернативных сейсмогенных механизмов рассматривается также изменение величины и конфигурации теллурических токов [168]; магнитострикция [111]; обратный пьезоэлектрический эффект [144, 183]; действие пондеромоторных сил [45]; термическое расширение при нагреве среды [2, 171]; преобразование электромагнитной энергии в колебательную энергию электропроводящих флюидов в поровых каналах [163]; гравитационный механизм (передвижение центра масс системы Солнце – Земля при выбросе корональной массы

вызывает колебания внутреннего ядра, которые передаются в земную кору) [114-115]. Вместе с тем следует отметить, что в недавно вышедшей работе [172] высказываются критические замечания к результатам работы [168], а именно приводятся аргументы, опровергающие возможность возникновения механического эффекта, вызывающего землетрясение при изменении теллурических токов в условиях сильных магнитных возмущений. Исследование в водонасыщенном регионе Московской области [87] показало, что магнитострикция в этом случае не может обеспечить преобразование энергии электромагнитного поля в механическую энергию. В целом надо констатировать, что все имеющиеся теоретические подходы еще недостаточно развиты для объяснения возможной связи между солнечно-геомагнитной активностью и геодинамическими процессами.

В пользу наличия отклика сейсмических колебаний на геомагнитное возмущение может свидетельствовать экспериментально полученное увеличение сейсмической активности при применении мощных МГД-генераторов [2, 142, 165-166]. В статьях [148, 161-162] делается акцент на сходство между изменением сейсмичности во время магнитных бурь и вызванным искусственными источниками. Лабораторные эксперименты [1, 69-70, 224] по наблюдению акустической эмиссии образцов горной породы при воздействии на них электрических импульсов, демонстрируют всплеск акустической эмиссии (образование трещин) после подачи импульса тока на образец. Электромагнитное инициирование сейсмических событий подтверждают исследования образцов горных пород при внешних электромагнитных воздействиях на пружинных и рычажных прессах, а также на моделях скольжения, имитирующих сейсмический цикл (накопление напряжений и сброс) в сейсмогенном разломе [107, 263-265, 494]. Эффективность инициирующих эффектов электромагнитного воздействия определяется наличием свободного и связанного флюида, который заполняет трещины, поры и полости [72, 146, 165].

В итоге: в настоящее время отсутствует однозначное представление о связи солнечно-земных и геодинамических процессов. Спорными остаются вопросы о направленности этой связи, а также о физических процессах, обеспечивающих преобразование электромагнитной энергии в энергию механических колебаний. Практически не проработан вопрос о влиянии сильных магнитных возмущений на параметры микросейсмического фона, не установлены количественные и причинно-

следственные связи, характеризующие влияние геомагнитных вариаций, например, на микросейсмический фон.

Выводы к главе 1: Постановка цели исследования

В главе 1 представлен обзор исследований вариаций магнитного поля Земли, методов, применяемых при оценке магнитотеллурических функций, а также результатов, полученных при исследовании влияния солнечной и геомагнитной активности на сеймотектонические процессы.

В разделе 1.1. рассматриваются результаты изучения особенностей вековой вариации геомагнитного поля, аналитические модели, применяемые для описания вариаций магнитного поля Земли. Несмотря на значительный объем полученных данных, остаются не в полной мере решенными вопросы, связанные с достоверностью аналитических моделей (в частности, новой версии модели *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*) для описания и прогноза локальных вариаций магнитного поля, и с частотой и глобальностью джерков (резкое изменение наклона первой производной вековой вариации).

В разделе 1.2. приводятся опубликованные результаты исследований периодичностей геомагнитного поля и причин, их вызывающих. Показано, что для вариаций магнитного поля Земли, в основном, характерны 11-летняя, годовая и полугодовая периодичности, а также 27-суточная периодичность с гармониками около двух недель, 9 и 6 суток. На данный момент нет однозначного представления об источниках происхождения этих периодичностей. Можно предположить, что указанные периодичности обусловлены некой совокупностью источников, действие которых может различаться в разные временные интервалы. В связи с этим, представляет интерес исследование временной динамики периодичностей геомагнитного поля. Другим важным аспектом периодических вариаций магнитного поля является расщепление спектральных гармоник, которое связывают либо с действием лунно-солнечного прилива, либо с модуляцией большими периодами. В целом же причины расщепления до конца не ясны.

В разделе 1.3. выполнен обзор работ, посвященных исследованию регулярной суточной вариации геомагнитного поля в условиях магнитоспокойных дней. Показано, что причиной этих суточных геомагнитных вариаций являются внешние источники

тока, связанные с процессами магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Под влиянием комбинации различных эффектов величина и фаза регулярной суточной вариации претерпевают изменение от суток к суткам, и они различаются в зависимости от места наблюдений. В связи с этим актуально проведение анализа морфологических особенностей суточной вариации в разных регионах Земли, в частности, в европейском секторе, в том числе, влияния на суточный ход геомагнитного поля в периоды магнитоспокойных дней лунно-солнечного прилива и модуляции большими периодами.

В разделе 1.4. представлен обзор индексов, использующихся для описания степени возмущенности геомагнитного поля, подробно рассмотрен широко применяемый на практике геомагнитный индекс *K*. Кроме того, в разделе приведены результаты исследования взаимосвязи между солнечной и геомагнитной активностью, которая отличается в зависимости от цикла солнечной активности. Принимая во внимание, что в 2009 г. начался необычный солнечный цикл, который характеризуется достаточно низким уровнем солнечной активности, необходимо рассмотреть особенности геомагнитной активности и ее связи с солнечной активностью для этого текущего цикла.

В разделе 1.5 даются определения магнитотеллурических передаточных функций, приводятся теоретические основы и описание методов их оценки. В целом, выбор метода при вычислении магнитотеллурических функций, в том числе магнитовариационных параметров, зависит от конкретной цели исследования, от гидрогеологической обстановки исследуемого участка земной коры, а также от типа и величины шумовых помех. При этом необходимо особо отметить, что, несмотря на длительное применение магнитотеллурики для решения разных прикладных и фундаментальных задач, остается недостаточно изученным вопрос, связанный с установлением закономерностей в вариациях магнитотеллурических передаточных функций, которые могут содержать важную информацию о строении, электрофизических характеристиках и динамике земных недр. Одной из возможных причин формирования вариаций электропроводности, и как следствие, изменения величины магнитотеллурических функций, является степень обводненности земной коры. В этой связи представляет значительный интерес определение зависимости между вариациями магнитотеллурических функций, отражающими изменение электропроводности среды, и изменением режима подземных вод.

В разделе 1.6 на основе анализа опубликованных работ показано, что вопрос, связанный с влиянием солнечной и геомагнитной активности на геодинамические процессы является сложным и неоднозначным. Тем не менее, большинство исследователей сходятся во мнении, что такое влияние существует. Определенный интерес вызывает установление влияния вариаций геомагнитного поля на механические колебания в земной коре. Однако, этот вопрос требует отдельного углубленного рассмотрения, причем с необходимостью установления количественных связей, характеризующих влияние геомагнитных вариаций, например, на микросейсмический фон.

Таким образом, с учетом анализа опубликованных данных, можно констатировать, что, несмотря на значительный объем имеющийся информации о вариациях магнитного поля Земли и о его связи с геодинамическими процессами, остается ряд вопросов, которые в должной степени не проработаны и не решены до настоящего времени. Это, определяет цель настоящей работы: установление особенностей геомагнитных вариаций с учетом их возможных связей с микросейсмическим фоном и уровнем подземных вод в условиях средних широт.

ГЛАВА 2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ, МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ РЯДОВ

2.1 Используемые данные и краткая характеристика района инструментальных наблюдений

В качестве исходных данных при анализе использовались результаты синхронных наблюдений за геомагнитными вариациями, сейсмическими колебаниями и режимом подземных вод на среднеширотной Геофизической обсерватории "Михнево" Института динамики геосфер Российской академии наук (ГФО "Михнево").

Измерения вариаций геомагнитного поля. Измерения вариаций геомагнитного поля выполнялись в стационарно оборудованном пункте (геомагнитном павильоне), фотография которого приведена на рисунке 2.1а.

Регистрация геомагнитных вариаций выполнялась с помощью автоматического феррозондового магнитометра LEM1-018i (рисунок 2.1б). Магнитометр (рисунок 2.2) состоит из блока датчиков, в который входят: трёхкомпонентный феррозондовый магнитометр с сердечником типа "рейс-трек" и два датчика температуры, и электронного блока, в который входят: микроконтроллер МК1, отвечающий за работу магнитометра, микроконтроллер МК2, обеспечивающий преобразование данных, получаемых с феррозондовых датчиков (ФЗ), их обработку и накопление, и дополнительный датчик температуры. Технические характеристики приборов приведены в таблице 2.1. Сигналы, поступающие с ФЗ, усиливаются и фильтруются с помощью фазочувствительных усилителей ключевого типа (ФЧП). Отфильтрованный сигнал поступает с ФЧП на один из каналов трехканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП), где происходит оцифровка сигнала. Каждый канал АЦП считывает четыре значения напряжения входного сигнала (моменты считывания значений приведены на рисунке 2.3) и производит вычисление по формуле:

$$U_i = \left(\left(\frac{U_i(t_2) + U_i(t_4)}{2} \right) - \left(\frac{U_i(t_1) + U_i(t_3)}{2} \right) \right) \text{ и осреднение полученных данных } U_c = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}$$

за период времени, кратный 20 мс. Такая операция позволяет устранить влияние температурного дрейфа нуля и шумов входного сигнала и АЦП. По полученным средним значениям по каждому каналу АЦП микроконтроллер МК1 вычисляет сигнал компенсации, который затем корректируется цифро-аналоговыми преобразователями

(ЦАП), далее через блок преобразователя напряжение-ток (U/I) подаётся в обмотку компенсации W_c . При временном отсутствии питания или при сбое микроконтроллера инициируется автоматический перезапуск системы, при этом происходит компенсация внешнего магнитного поля. На выходе магнитометра для каждого из каналов формируется сигнал в виде 24 разрядного кода, который поступает по последовательному интерфейсу в оперативную память МК2 и далее на FLASH память. Управление процессами записи, считывания и стирания FLASH памяти осуществляется процессором МК2. Одновременно значения величины измеряемого магнитного поля для всех трех компонент отображаются на жидкокристаллическом дисплее. Синхронизация работы магнитометра осуществляется с дискретизацией 1 секунда с помощью встроенного приемника GPS. Передача данных в компьютер, и в дальнейшем с помощью линии связи на основной сервер ИДГ РАН, осуществляется с помощью проводного дуплексного интерфейса RS-232 (технические характеристики приведены в таблице 2.1).



Рисунок 2.1 – Внешний (а) и внутренний (б) вид геомагнитного павильона на ГФО "Михнево".

Специализированное программное обеспечение магнитометра LEMI-018i состоит из: 1) `refmag.exe` (управление магнитометром, визуализации в режиме реального времени данных, преобразование бинарных данных, записанных в FLASH памяти, в текстовый формат); 2) `refmag.def` (конфигурационная и калибровочная информация магнитометра); 3) `refmag.log` (файл протокола, где хранится информация о времени запуска/остановки магнитометра, об ответах аппаратуры, сообщения об ошибках); 4)

файлы .txt (файлы данных построены в виде колонок, в которых каждая строка соответствует одному отсчету значений трех компонент индукции магнитного поля, температур феррозондового датчика и блока электроники, привязанному к времени UTC (по Гринвичу) с шагом по времени 1 с).

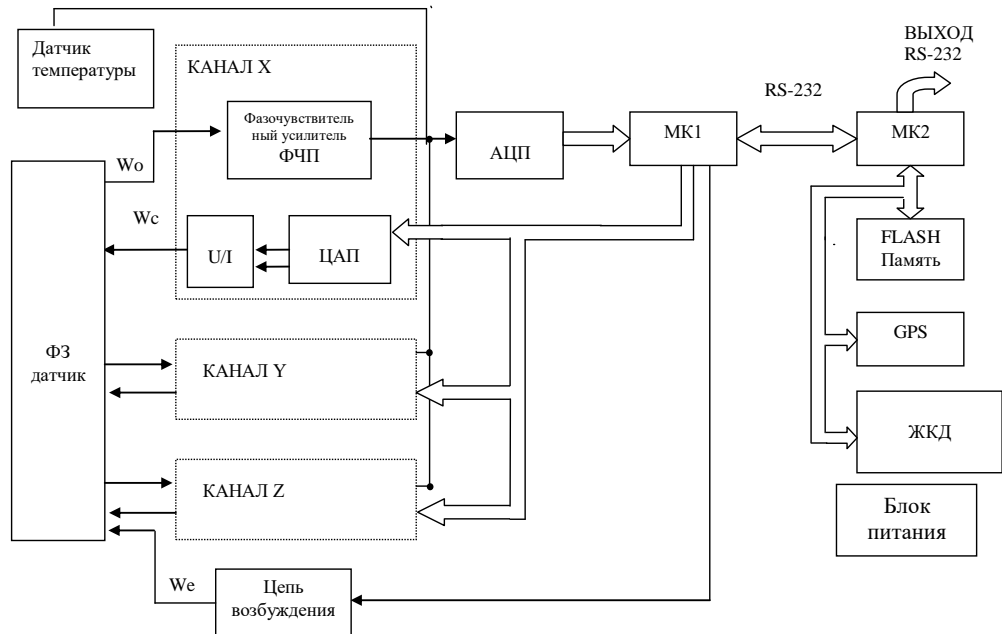


Рисунок 2.2 – Схема магнитометра LEMI-018i.

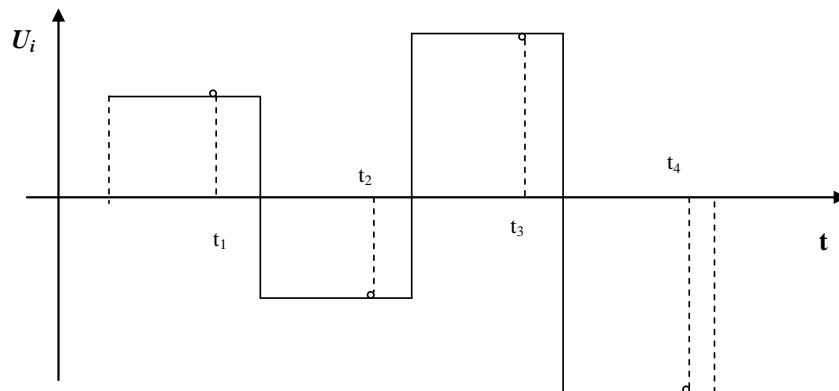


Рисунок 2.3 – Схематическое изображение входного напряжения на АЦП за один период частоты возбуждения.

В настоящей работе привлекались цифровые ряды регистрации геомагнитного поля с дискретизацией 1 мин, выполненной за период с 27.02.2008 г. по 31.12.2017 г.

Таблица 2.1. Технические характеристики магнитометра LEMI-018i

Параметры	Значение параметров
Датчики магнитометра LEMI-018i	
Диапазон измерений	$\pm 68\,000$ нТл
Разрешающая способность	10 пТл
Уровень шумов в диапазоне 0,03-0,3 Гц	< 15 ср. кв. пТл
Долговременный дрейф нуля	$< \pm 5$ нТл/год
Температурный дрейф	$< 0,2$ нТл/°С
Частота выборки	1 с^{-1}
Объем встроенной памяти	2 Гб
Рабочий диапазон температур	$-20 \dots +60^\circ\text{C}$
Термометры магнитометра LEMI-018i	
Диапазон измерений	$-50 \dots +70^\circ\text{C}$
Разрешающая способность	0.002°C
Основная погрешность измерений	0.5
Интерфейс RS-232	
Диапазон напряжения входного сигнала	$\pm 5 \dots 15\text{ В}$
Диапазон напряжения выходного сигнала	$\pm 9 \dots 11\text{ В}$
Длина линии связи с внешним устройством	не более 10 м
Скорость обмена данными	до 115200 бит/с
Используемые линии передачи данных	TxD, RxD, GND

Измерения вариаций уровня подземных вод. На территории обсерватории "Михнево" в экспериментальных скважинах проводятся наблюдения за режимом подземных вод. Измерения вариаций уровня подземных вод выполняются с использованием стандартных электроуровнемеров и прецизионных датчиков уровня LMP308i (производство Германия) с дискретностью 1 с и точностью измерений 0,1 мм. В погружном зонде LMP308i предусмотрена активная компенсация отклонений характеристик чувствительного элемента: компенсация нелинейностей, компенсация влияния температуры. В настоящей работе выполнена обработка рядов среднесуточных значений уровня верхнего безнапорного водоносного горизонта за период наблюдений 2010 – 2013 гг.

Измерение сейсмических колебаний. В качестве исходных данных использовались данные сейсмического мониторинга на обсерватории "Михнево", выполненного с помощью трехкомпонентного короткопериодного магнитоэлектрического сейсмоприемника STRECKEISEN STS-2 (рисунок 2.4а), работающего в режиме велосиметра и расположенного в шахте на глубине 20 м. Три одинаковых датчика с электроникой и источник питания вмонтированы в цилиндрический корпус. Конструкция сейсмоприемника предназначена для минимизации искажений, вызванных изменением атмосферного давления с помощью изолирования верхней и нижней крышек от массивной опорной платформы, таким же способом как изолируют пьедестал сейсмографа от расположенных рядом зданий. Верхние и нижние крышки прикреплены к опорной платформе 0-образными кольцами, позволяющими крышкам сжиматься без нагрузки на прибор. Запаянная конструкция и массивная металлическая опорная платформа обеспечивают теплоизоляцию и инерцию. Три датчика взаимно выровнены с помощью установки на общую раму. Исходный электрический выход каждого из датчиков STS-2 содержит как вертикальные, так и горизонтальные компоненты движения (рисунок 2.4б). Эти необработанные сигналы датчиков электрически суммируются в электронике STS-2 для обеспечения стандартных вертикальных и горизонтальных выходных сигналов:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

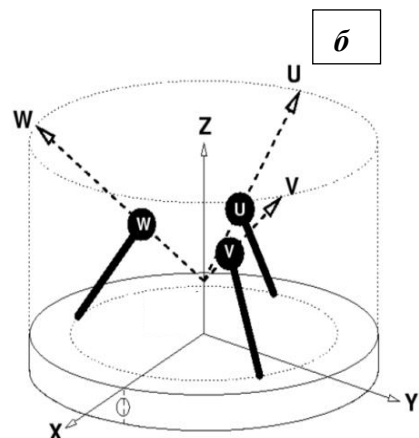


Рисунок 2.4 – Расположение сейсмоприемника на постаменте шахты ГФО "Михнево" (а) и геометрия трехкомпонентного сейсмометра STS-2 (б).

Три дополнительных выходных линии используются для контроля либо механического баланса, либо необработанных широкополосных выходных сигналов отдельных датчиков. Технические характеристики сейсмометра приведены в таблице 2.2.

Сбор и накопление данных проводились с помощью программируемого регистратора RefTek-72F-08 (рисунок 2.5), его технические характеристики приведены в таблице 2.2. Регистратор имеет внутреннюю память данных в виде двух компактных флэш-карт и может одновременно записывать на CF карту и передавать данные в близком к реальному масштабу времени с использованием Ethernet.

Таблица 2.2. Технические характеристики сейсмоприемника и цифрового регистратора

Параметры	Значение параметров
Сейсмоприемник STS-2	
Рабочий диапазон частот	0,0083 – 50 Гц
Калибровочная постоянная	1 мА – 0,25 В
Рабочий режим по температуре	-20... +70 °С
Регистратор RefTek	
Количество каналов регистрации	6
Разрядность АЦП	24
Частота опроса	1-1000 Гц

В настоящей работе привлекались данные сейсмического мониторинга за период 2008 – 2015 гг. Результаты регистрации геофизических полей на ГФО "Михнево" размещены на сайте Института динамики геосфер Российской академии наук [687].

Дополнительно привлекаемые данные. Для подтверждения, что установленные в настоящей работе особенности характерны, в целом, для вариаций геомагнитного поля, использовались данные регистрации геомагнитного поля, полученные на станциях Международной магнитной сети INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network) [688]: Магнитная обсерватория "Киев" Института геофизики Национальной академии наук Украины, Киевская область, пос. Дымер (50,717° с.ш., 30,30° в.д.) за период 2009 – 2015 гг.; Геофизическая обсерватория "Борок" Института физики Земли Российской академии наук, Ярославская область, пос. Борок (58,03° с.ш.,

38,14° в.д.) за период 2008 – 2017 гг.; Центральная геофизическая обсерватория "Бельск" Геофизического института Польской академии наук, Польша, г. Бельск (51,837° с.ш., 20,792° в.д.) за период 2008 – 2017 гг.

Регистрация трех компонент геомагнитного поля на обсерватории "Киев" выполнялась с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-008, электронный блок которого обеспечивает преобразование, обработку и хранение информации о вариациях магнитного поля и передачу ее на компьютер через интерфейс RS232. Встроенный GPS-приемник корректирует время внутренних часов и определяет координаты местоположения магнитометра. Технические характеристики магнитометра LEMI-008 приведены в таблице 2.3.

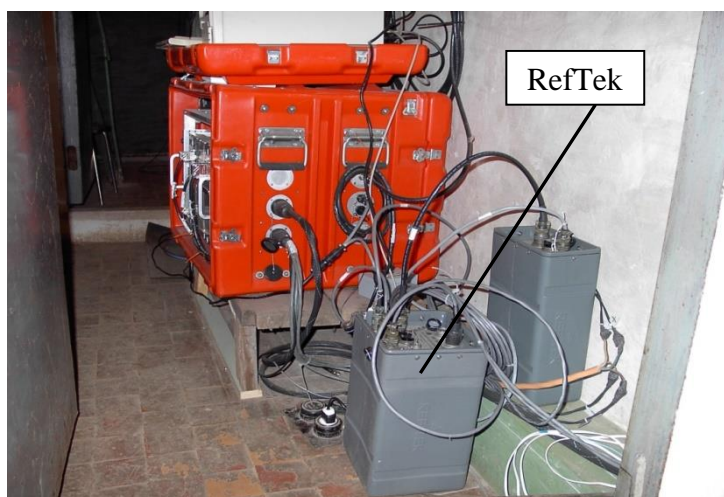


Рисунок 2.5 – Программируемый цифровой регистратор RefTek в приборном помещении штольни ГФО "Михнево"

Регистрация трех компонент геомагнитного поля на обсерватории "Борок" выполнялась с помощью трехосного феррозондового магнитометра IPGP VM391. Одна из основных характеристик этого магнитометра заключается в том, что он гомоцентричен, то есть измеряет три компоненты поля в одной и той же точке. Трехкомпонентный магнитометр VM391 имеет динамический диапазон $\pm 2 \cdot 10^4$ нТл, полосу пропускания 0 – 1 Гц и частоту дискретизации 0,2 Гц. Минутные данные, полученные с помощью стандартного для сети INTERMAGNET цифрового гауссовского фильтра собираются регистратором данных IPGP ENO2 и передаются на Геомагнитный информационный узел INTERMAGNET (GIN) в Париж по электронной почте в течение 72 часов.

Регистрация вариаций трех компонент геомагнитного поля на обсерватории "Бельск" выполнялась с помощью торсионного кварцевого вариометра системы В.Н. Боброва. Это магнитометр имеет хорошую долгосрочную стабильность базисных значений (несколько нТл в год) и разрешение около 0,01 нТл. Температурный коэффициент вариометров составляет 0,2 нТл/К.

В настоящей работе проводилась теоретическая оценка вековой вариации геомагнитного поля и его производной на основе модели International Geomagnetic Reference Field (*IGRF*) 12-го поколения Международной ассоциации геомагнетизма и аэрномии [690]. В этой модели разложение потенциала магнитного поля ограничивается коэффициентами Гаусса от 1-й до 13-й степени и порядка, описывает главное магнитное поле и его вековую вариацию. Эта версия модели *IGRF* состоит из 20 моделей *DGRF* для эпох с 1900 года по 1995 год до степени $N = 10$ (один раз в 5 лет), трех моделей *DGRF* для эпох 2000.0, 2005.0, 2010.0 до степени $N = 13$ и одной *IGRF* для эпохи 2015.0 до степени $N = 13$, включающей прогностическую модель до 2020.0 до степени $N = 8$.

Таблица 2.3. Технические характеристики магнитометра LEMI-008

Параметры	Значение параметров
Диапазон измерений:	100 000 нТл
Диапазон I	3200 нТл
Диапазон II	
Разрешающая способность	10 нТл
Диапазон I	0,1 нТл
Диапазон II	2 мВ / нТл
Уровень шумов в диапазоне 0,03 – 0,3 Гц	
Диапазон измерения изменений на аналоговом выходе	5000 нТл
Пропускная способность аналогового выхода DC	1 Гц
Коэффициент трансформации аналогового выхода	<30 мин дуги
Ошибка ортогональности	$\pm 9 \times 10000$ нТл
Диапазон изменения смещения шага по каждой оси	$\pm 9 \times 1000$ нТл
Коэффициент трансформации датчика температуры	10 мВ/°С

При анализе геомагнитной активности на ГФО "Михнево" привлекались значения планетарного K_p индекса, вычисленного в Германском научно-исследовательском центре геонаук [689]. Глобальный индекс K_p – среднее значение уровней возмущений в двух горизонтальных компонентах поля, наблюдаемых на 13 субавроральных станциях, расположенных между 63° северной и 46° южной геомагнитными широтами. По данным 13 обсерваторий вычисляется K_p - индекс, лежащий в пределах от 0 до 9, индекс определяется с точностью до 1/3: 4- означает 3 и 2/3, 4o – 4 ровно, 4+ означает 4 и 1/3 (28 значений).

В настоящей работе при сопоставлении геомагнитной и солнечной активностей в качестве меры солнечной активности, используются индекс $F10.7$ – параметр, определяющий интенсивность (плотность потока) радиоизлучения Солнца на частоте 10,7 см (2800 МГц) и число Вольфа. Привлекались данные солнечной активности, размещенные на сайте Геофизического центра данных в Боулдере [691]. Каждое значение $F10.7$ – измерение общей эмиссии на длине волны 10,7 см от всех источников, присутствующих на диске Солнца, выполненное в течение 1 часа. Длина волны в районе 10 см лучше всего подходит для мониторинга уровня солнечной активности, поскольку солнечная эмиссия на этих длинах очень чувствительна к условиям в верхней хромосфере и у основания короны. Число Вольфа или международное число солнечных пятен показывает число пятен и групп пятен на поверхности Солнца.

Краткая характеристика района инструментальных наблюдений. Геофизическая обсерватория "Михнево" (координаты: $54,959^\circ$ с.ш.; $37,766^\circ$ в.д.) расположена в 85 км к югу от города Москвы (юг Московской области), на расстоянии 8,6 км северо-восточнее Приокско-Террасного биосферного заповедника. Местоположение обсерватории характеризуется удаленностью от крупных промышленных объектов, естественными условиями, практически ненарушенными антропогенным влиянием. Южнее обсерватории на расстоянии ~12 км прослежен субширотной Приокский участок Нелидово-Рязанской шовной зоны (НРШЗ) (рисунок 2.6), который выделен по ряду геоморфологических и геологических признаков неотектонической активности [36].

Геологическое строение территории обсерватории "Михнево" характеризуется тектонической двухярусностью. Нижний структурный этаж (кристаллический фундамент) сформирован породами архея, верхний структурный этаж (осадочный

чехол) сложен верхнепротерозойскими, девонскими, каменноугольными и мезокайнозойскими отложениями общей мощностью 1,3 км [74]. С поверхности до глубины 11 м преимущественно распространены суглинки четвертичного возраста. В интервале 11 – 56 м вскрыты отложения каширского горизонта среднего карбона (известняки неравномерно трещиноватые, кавернозные) с подчиненными прослоями глин.

Подстилающая поверхность в окрестности границы земная кора-атмосфера представлена разнообразными стратиграфо-генетическими горизонтами и комплексами, которые характеризуются различной степенью водонасыщения. Такая многокомпонентная система оказывает влияние на условия формирования режимов геофизических полей и также на их взаимодействие.

В гидрогеологическом отношении Приокский участок НРШЗ расположен в южной части Московского артезианского бассейна, представляющего собой сложную многослойную систему водоносных горизонтов (основные водоупорные и водоносные горизонты на территории обсерватории "Михнево" представлены на рисунке 2.7 и в таблице 2.4). В целом, режим подземных вод района исследований зависит от гидрологического режима реки Оки, протекающей на расстоянии ~12 км южнее обсерватории "Михнево" [46]. Долина реки Оки неравномерно по глубине эродирует кровлю отложений карбона и является региональной дренажной.

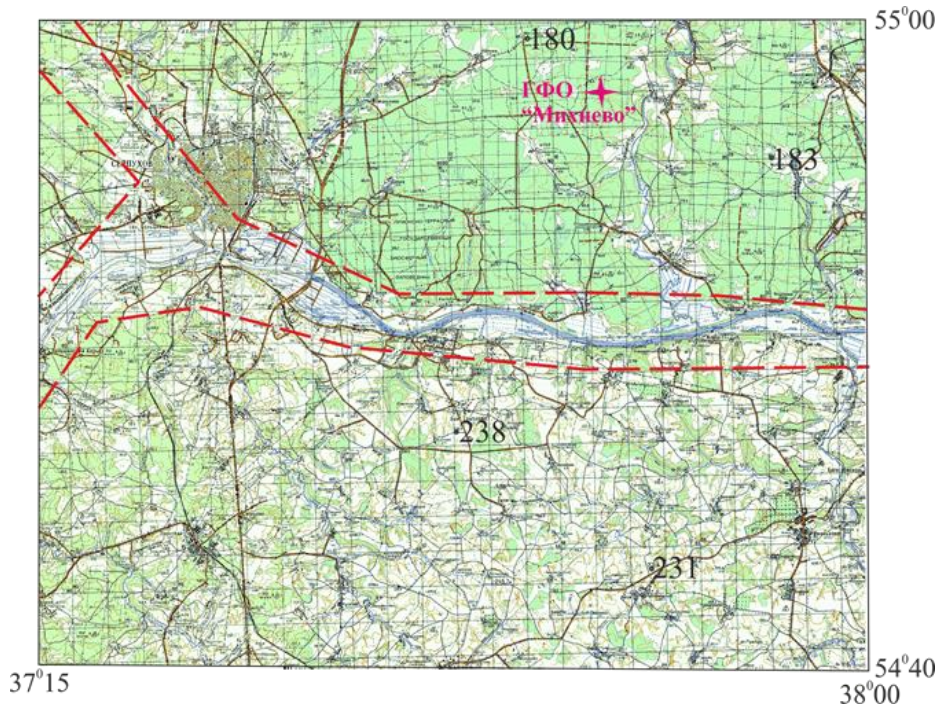


Рисунок 2.6 – Положение Приокского участка НРШЗ (границы обозначены пунктирными красными линиями)

Наблюдения за режимом каширского безнапорного водоносного горизонта проводятся в наблюдательной скважине, вскрывшей верхнюю обводненную часть лопасненской толщи в интервале 24,9 – 27,4 м и нижнюю обводненную часть нарской толщи в интервале 43 – 56 м (рисунок 2.8). Амплитуда сезонных вариаций уровня обводненной лопасненской толщи не превышает 0,8 м, нарской толщи составляет 2,6 м [48]. С точки зрения изучения возможного влияния на геомагнитные вариации основной интерес представляет безнапорный водоносный горизонт, так как в этом случае вариации уровня подземных вод пропорциональны изменению мощности водопроницающего слоя, то есть, фактически – эффективной проводимости верхних участков земной коры [5].

Таблица 2.4. Основные водоупорные и водоносные горизонты на территории обсерватории "Михнево"

Литологическая колонка	Гидрогеологические подразделения		Мощность, м	Положение кровли горизонта, м глубина залегания абс. отм.	Положение уровня воды, м <u>глубина залегания</u> абс. отм.	Напор над кровлей, м	Удельный дебит, л/с родники скважины	Водопроницаемость, м ² /сут	Минерализация, г/л	Практическое значение
	Индекс	Название								
	C ₂ k ^к	C ₂ lp	1-21	<u>5-25</u> 175-155	<u>0-21</u> 170-172	б/н, 0-16	<u>0,2-2</u> 1-1,5	32	0,3-0,5	Сельское водопользование
		C ₂ ht	6-9	<u>5-35</u> 170-145						
		C ₂ nr	1-22	<u>3-45</u> 175-130	<u>5-28</u> 152-169	б/н, 0-18	<u>0,2-3</u> 0,2-2	10-200	0,3-0,5	Сельское водоснабжение
	C ₂ vr	Водоупорный верейский терригенный горизонт. Глины, алевроиты.	1-22	<u>1-6</u> 160-110						
	C ₂ az	Водоносный локально водоупорный азовский терригенный комплекс. Пески, глины, песчаники.	102	<u>30-70</u> 80	<u>6</u> 108	25-30	0,2-2	20-150	0,4	Не используется
	C ₁ pr	Водоносный протвинский карбонатный комплекс. Известняки, мергели, глины.	3-21	<u>7-78</u> 138-96	<u>1-55</u> 109-143	б/н, 0-28			0,4-0,5	Ограниченное использование
	C ₁ st	Водоупорный стешевский терригенный горизонт. Глины.	6-9	<u>16-90</u> 130-80						
	C ₁ ok-tr	C ₁ mh-tr	45-50	<u>16-80</u> 122-66	<u>6-78</u> 99-109	б/н, 0-18	от 0,1-2 до 26-59	от 10-100 до 2000-4000	0,3-0,5	Основной горизонт
		C ₁ al	7-15	<u>67-135</u> 81-48	<u>5-75</u> 102-107	40-60	<2	10-200	0,4-0,5	Совместно с михайловско-таруским
		C ₁ bb-tl	45	<u>95-150</u> 45-65	<u>1-18</u> 106-108	70-75	до 5	до 80	0,6-1	Не используется
	C ₁ ml-up	C ₁ up	20	<u>115-120</u> -14 - -15	<u>+0,3-16</u> 110	97-124	0,01	1-2	1-1,8	Не используется
		C ₁ ml	4	<u>132</u> -4	<u>5-10</u> 165-170					

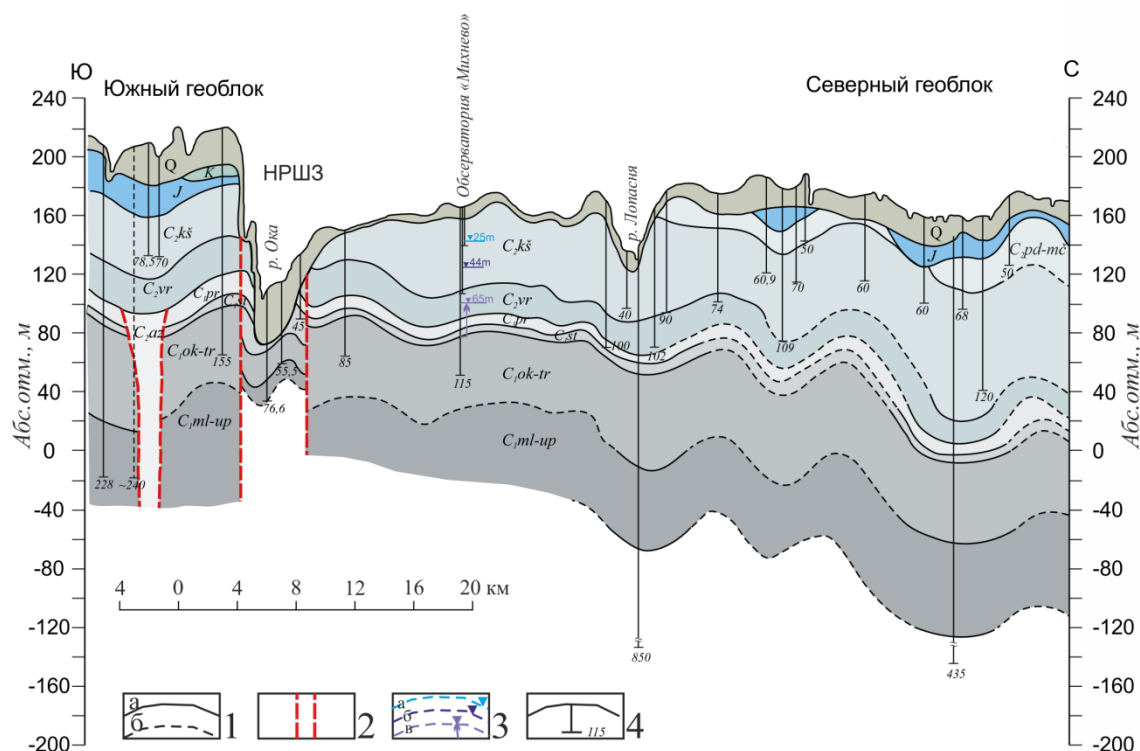


Рисунок 2.7. – Геологический разрез (1 – геологическая граница: а – достоверная, б – предполагаемая; 2 – разрывное нарушение; 3 – уровень подземных вод (а, б – каширский водоносный горизонт: а – лопаснинская толща, б – нарская толща; в – окско-тарусский водоносный комплекс; 4 – скважина, внизу – глубина, м; разновозрастные отложения: Q – четвертичные, К – меловые, J – юрские, C_{2pd-mc} – подольско-мячковский горизонт среднего карбона, остальные горизонты и комплексы приведены в таблице 2.4)

Глубина, м	Геологический индекс		Глубина залегания подошвы слоя, м		Краткое описание пород	Литологическая колонка	Уровень воды, м	Геофизическая характеристика пород	
			Глубина залегания подошвы слоя, м	Мощность слоя, м				Гамма-активность, мкр/час	Скорость пластовая, км/с
5	Q	glIdn	10.8	9.1	Супесь	[Литологическая колонка]	25,8м		0.3
10					Суглинок красный, плотный, с глубины 5м-коричневый			10	0.75
15								4.6	1.85
20								4.6	
25		C ₂ lp	27.4	16.6	Известняк серый, желтовато-белый			4.6	1.6
30		C ₂ ht	32.9	5.5	Глина пестроцветная			20	
35									2.2
40					Известняк светло-серый, трещиноватый кавернозный с прослоями глин			3.8-6 5.8-9.2	
45	C ₂ ks	C ₂ np	56.5	23.6					

Рисунок 2.8 – Геологический разрез наблюдательной скважины, оборудованной на каширский безнапорный водоносный горизонт

2.2. Исследование составляющих временных рядов

Подготовка данных к анализу и их предварительный анализ. Поскольку получаемые в результате инструментальных наблюдений за физическими полями цифровые ряды данных в ряде случаев содержат пропуски, появляется необходимость подготовки этих данных для цифровой обработки.

Так как регистрация магнитного поля Земли на рассматриваемых обсерваториях выполняется в разных системах координат (три ортогональных компоненты полного вектора магнитного поля (B_x, B_y, B_z) и две компоненты и угол (H, B_z, D)), все данные регистрации приводились к одной системе координат. Взаимосвязь между элементами геомагнитного поля показана на рисунке 2.9. При приведении к единой системе координат (географическая система координат: ось x направлена на географический север, y – на восток, z – вертикально вниз) были использованы следующие формулы:

$$T = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{H^2 + B_z^2}, \quad H = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad B_x = H \cos D, \quad B_y = H \sin D, \quad B_z = T \sin I,$$

$$H = T \cos I, \quad D = \tan^{-1} \left(\frac{B_x}{B_y} \right).$$

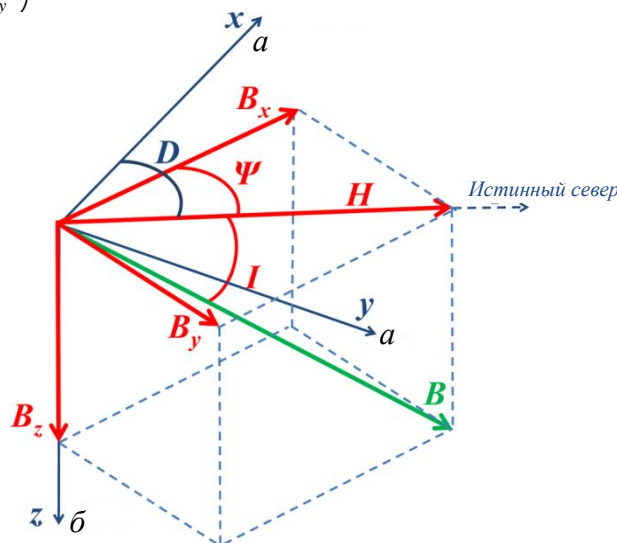


Рисунок 2.9 – Составляющие полного вектора индукции магнитного поля Земли: B_x – северная, B_y – восточная, B_z – вертикальная, H – горизонтальная, B – полный вектор, D – магнитное склонение, I – магнитное наклонение

Подготовка данных заключалась в обнаружении и удалении выбросов (спайков) и заполнении пропусков. С целью удаления выбросов строились диаграммы размахов ("ящик с усами") [377], демонстрирующие параметры распределения, и как явные

выбросы, так и значения с подозрением на выброс. Затем обнаруженные подозрительные значения проверялись с помощью критерия Титъена-Мура [60, 619] и критерия Граббса [60, 362]. Выделенные выбросы удалялись, в результате чего образовывались пропуски, которые затем рассматривались в общем ряду всех пропусков, включая изначальные.

Наличие пропусков в данных делает невозможным применение классических методов из-за неравномерного расположения отсчетов данных по времени. Существуют два пути решения этой проблемы: 1) как-то восстанавливать пропущенные значения, и таким образом удалить пропуски, а затем использовать классические методы для обработки и анализа; 2) применять методики, которые предназначены для обработки и анализа неэквидистантных временных рядов. В связи с тем, что за изучаемый период времени в данных инструментальных наблюдений имелось небольшое количество пропусков, пропущенные данные могли быть восстановлены без особой потери информации и без появления ложной информации в характеристиках временного ряда. В настоящей работе восстановление пропущенных значений ряда осуществлялось с помощью линейной интерполяции при незначительном количестве пропусков. В случае длительных интервалов пропущенных значений для восстановления ряда применялось двойное преобразование Фурье [52]. Следует отметить, что для целей настоящего исследования использование восстановления на основе преобразования Фурье оказалось оптимальным по сравнению с гравитационным сглаживанием [39], как с точки зрения трудоемкости, так и по качеству полученных результатов.

С целью выбора наиболее подходящих методов для анализа на следующем этапе осуществлялся предварительный анализ полученных цифровых рядов, основанный на проверке гипотез нормальности, неслучайности (независимости) и стационарности. На первом этапе анализа временного ряда на нормальность распределения строилась гистограмма (график, показывающий частоту попаданий значений временного ряда в отдельные интервалы), которая сравнивалась с теоретической кривой нормального распределения. Для более корректного заключения о нормальности распределения значений ряда применялся аналитический метод (статистика Жарка-Бера) [389]. Проверка данных на неслучайность выполнялась с использованием фазово-частотного критерия Валлиса-Мура [68]. Исследование на стационарность используемых цифровых

рядов выполнялось на основе анализа автокорреляционной (коррелограмма) и частной автокорреляционной функций [36].

Оценка трендовой составляющей. Исходя из свойств используемых цифровых рядов, выделение трендовой составляющей проводилось на основе сингулярного спектрального анализа (метод "Гусеница") [44], поскольку этот метод может применяться как к стационарным, так и к нестационарным рядам и не предполагает знания параметрической модели ряда. Главная идея спектрального сингулярного анализа заключается в том, что, если имеется одномерный временной ряд и необходимо найти какую-либо компоненту (в настоящей работе трендовую составляющую) этого ряда, то этот временной исходный ряд включается в евклидово пространство большего измерения. На следующем этапе находится подпространство, соответствующее искомой компоненте (в настоящей работе, идентификация трендовой составляющей осуществлялась методом низких частот [193]) и, наконец, восстанавливается составляющая временного ряда, соответствующая этому подпространству. Особо стоит подчеркнуть, что выбор подпространства – решающий вопрос в спектральном сингулярном анализе [318].

Оценка периодических составляющих (периодик). Предварительно с целью получения основных периодичностей применялся метод спектрального анализа (метод периодограмм) [373]. Следует отметить, что преобразование Фурье имеет ряд недостатков: во-первых, невозможно корректно провести анализ нестационарных временных рядов и совершенно невозможно провести анализ их особенностей (сингулярностей) [181, 517]. Это связано с тем, что в частотной области происходит "размазывание" особенностей сигналов (разрывов, ступенек, пиков и т.п.) по всему частотному диапазону спектра. Во-вторых, происходит осреднение характерных частотных особенностей по всему временному ряду, т.к. спектральные коэффициенты вычисляются интегрированием по всему временному ряду. Это делает нецелесообразным применение преобразования Фурье для анализа частотных характеристик временного ряда в произвольные моменты времени, т.е. для анализа локальных свойств временного ряда при быстрых временных изменениях его спектрального состава.

Поскольку вариации геомагнитного поля имеют сложную нерегулярную структуру и содержат разномасштабные локальные особенности, в настоящей работе с

целью исследования динамики периодичностей использовалось непрерывное вейвлет-преобразование для дискретного временного ряда [296, 471, 621]. В качестве материнского вейвлета был выбран комплексный вейвлет Морле [9, 335] из-за близости его формы к форме анализируемых в работе временных рядов, а также из-за возможности разделения фазовой и амплитудной компонент, что существенно облегчает анализ полученных результатов. Результатом вейвлет-преобразования одномерного временного ряда является двумерный массив значений коэффициентов. Визуализация вейвлет-спектров (амплитуды и фазы) осуществлялась с помощью изображения значений вейвлет-преобразования разными цветами, по осям откладывались время и период, что позволяет увидеть изменение во времени временного ряда на разных масштабах. В добавлении к этому вычислялся глобальный вейвлет-спектр, который аналогичен Фурье спектру, но более сглажен [621]. При выполнении вейвлет-преобразования конечного временного ряда возникают ошибки в расчете вейвлет-спектров на концах временного ряда. Для выделения области влияния краевых эффектов строился конус влияния (область, в которой автокорреляции значений вейвлет-преобразования увеличиваются в e раз на каждом масштабе [471]).

Для того, чтобы проверить коэффициенты вейвлет-разложения на точность, в настоящей работе проводилась реконструкция исходного ряда. Так как вейвлет-преобразование можно представить, как полосовой фильтр с известной функцией ответа, которой является вейвлет-функция, имеется возможность восстановить исходный временной ряд, используя деконволюцию или обратный фильтр. Однако, при использовании неортогонального непрерывного вейвлет-преобразования восстановление исходного временного ряда осложнено избыточностью по времени и масштабам коэффициентов вейвлет-преобразования. Тем не менее, при указанной избыточности можно восстановить временной ряд, используя различные вейвлет-функции [325]. В настоящей работе отличие восстановленного по коэффициентам вейвлет-разложения временного ряда (при восстановлении использовалась δ -функция) от оригинального составляло не более 15 %, что свидетельствует о корректности применения вейвлет-анализа.

С целью анализа скейлинга применяется метод максимума модуля вейвлет-преобразования, основанный на определении для каждого масштабного коэффициента локального максимума амплитуды (модуль) коэффициентов вейвлет-преобразования как

функции от времени. Полученные таким способом кривые, линии локальных максимумов (скелет), содержат информацию об иерархической структуре сингулярностей исследуемого временного ряда. По коэффициентам вейвлет-разложения вычислялась "статистическая сумма", а по ней находились параметр Херста (показатель Гельдера), спектр скейлинговых экспонент и спектр сингулярностей. Подробное описание метода приведено в статье [482]. Монофрактальным временным рядом считается такой ряд, для которого показатель Херста постоянен, спектр скейлинговой экспоненты представляет собой линейную зависимость. Наоборот, нелинейная кривая является показателем функций, обладающих мультифрактальными свойствами, при этом показатель Херста является флуктуирующей величиной. Ширина спектра сингулярности определяет степень мультифрактальности временного ряда, чем шире (уже) спектр сингулярности, тем более сильный (более слабый) мультифрактальный характер имеет временной ряд.

Выделение приливной составляющей. Выделение приливных составляющих (таблица 2.5) проводилось с помощью оценки спектров на основе метода параметрической авторегрессии [95]. По сравнению с непараметрическими (классическими) методами спектрального оценивания параметрические методы (авторегрессионные методы) позволяют уменьшить эффекты маскирования и растекания спектра и имеют лучшее разрешение по частоте [509]. Параметрическое спектральное оценивание заключается в построении модели временного ряда, на основе которой оценивается спектр.

При определении параметров авторегрессионной модели в настоящей работе использовался модифицированный по Бурге итерационный метод Дарбина-Левинсона (последовательное увеличение порядка авторегрессии) для решения системы уравнений Юла-Уолкера [450].

Дискриминация близких по периодам приливных волн (таблица 2.6) осуществлялась с привлечением метода выделения гармонических составляющих с помощью узкополосных адаптивных режекторных фильтров [169], преимущество которых заключается в простоте перестройки полосы пропускания и сильном подавлении соседних гармоник при точном слежении за частотой.

Таблица 2.5. Основные волны лунно-солнечного прилива

Символ	Аргументное число Дудсона	Период в ср. солнечных сутках	Происхождение (<i>L</i> - лунная, <i>S</i> – солнечная)
<i>Долгопериодические волны</i>			
M_0	055,555		<i>L</i> , постоянное сжатие
S_0	055,555		<i>S</i> , постоянное сжатие
S_a	056,554	365,25	<i>S</i> , эллиптическая волна
S_{sa}	057,555	182,62	<i>S</i> , деклинационная волна
M_m	065,455	27,55	<i>L</i> , эллиптическая волна
M_f	075,555	13,66	<i>L</i> , деклинационная волна
<i>Суточные волны</i>			
Q_1	135,655	1,1195	<i>L</i> , эллиптическая волна O_1
O_1	145,555	1,0758	<i>L</i> , главная лунная волна
M_1	155,655	1,03472	<i>L</i> , эллиптическая волна $^m K_1$
π_1	162,556	1,005506	<i>S</i> , эллиптическая волна P_1
P_1	163,555	1,002745	<i>S</i> , главная солнечная волна
S_1	164,556	1,0	<i>S</i> , эллиптическая волна $^s K_1$
$^m K_1$	165,555	0,99727	<i>L</i> , деклинационная волна
$^s K_1$	165,555	0,99727	<i>S</i> , деклинационная волна
ψ_1	166,554	0,99455	<i>S</i> , эллиптическая волна $^s K_1$
φ_1	167,555	0,99185	<i>S</i> , деклинационная волна
J_1	175,455	0,96244	<i>L</i> , эллиптическая волна $^m K_1$
OO_1	185,555	0,92942	<i>L</i> , деклинационная волна
<i>Полусуточные волны</i>			
$2N_2$	235,755	0,5377	<i>L</i> , эллиптическая волна M_2
μ_2	237,555	0,5363	<i>L</i> , вариационная волна
N_2	245,655	0,5274	<i>L</i> , большая эллиптическая волна M_2
ν_2	247,455	0,5261	<i>L</i> , эвекционная волна
M_2	255,555	0,5175	<i>L</i> , главная волна
λ_2	263,655	0,5092	<i>L</i> , эвекционная волна
L_2	265,455	0,50798	<i>L</i> , малая эллиптическая волна M_2
T_2	273,555	0,50069	<i>S</i> , большая эллиптическая волна S_2
S_2	274,554	0,5	<i>S</i> , главная волна
R_2	275,554	0,49932	<i>S</i> , малая эллиптическая волна S_2
$^m K_2$	275,555	0,49863	<i>L</i> , деклинационная волна
$^s K_2$	275,555	0,49863	<i>S</i> , деклинационная волна

Амплитудная модуляция. Поскольку в работе [594] показано, что положение дополнительных гармоник и их величина не зависят от того, какую мы предполагаем модуляцию (частотную или амплитудную), то при определении модулирующего периода в настоящей работе спектр результирующего модулированного колебания при наложении на колебание частотой ω колебания с меньшей частотой Ω задается как:

$$P = V \cos(\omega t + \varphi) + 0,5 Vm \cos[(\omega + \Omega)t + \Phi] + 0,5 Vm \cos[(\omega - \Omega)t + \Phi],$$

где V , ω и φ – амплитуда, круговая частота и начальная фаза несущего колебания соответственно; m – коэффициент (глубина) модуляции; Ω и Φ – частота и фаза модулирующего колебания соответственно; t – время. В этом случае спектр состоит из трех спектральных гармоник: гармоника с частотой ω – немодулированное несущее колебание, две другие симметрично расположенные гармоники, с частотами $\omega + \Omega$ (верхняя боковая частота) и $\omega - \Omega$ (нижняя боковая частота) – результат амплитудной модуляции.

2.3. Анализ геомагнитных данных

Оценка стационарного индекса магнитной активности K . В качестве характеристики геомагнитной активности в настоящей работе использован "локальный" индекс магнитной активности K . Вариации геомагнитного индекса K – все нерегулярные возмущения геомагнитного поля, вызванные излучением солнечных частиц в пределах рассматриваемого трехчасового интервала. Локальные уровни возмущений определяются измерением диапазона (разница между самыми высокими и самыми низкими значениями) в течение трехчасовых интервалов времени для наиболее возмущенной горизонтальной составляющей магнитного поля. В настоящей работе при вычислении K -индекса используется метод адаптивного сглаживания, который аккредитован рабочей группой "геофизические индексы" Международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики на Венской генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза в 1991 г. и рекомендован для использования в компьютерных программах автоматического вычисления K -индексов [495]. В этом случае, при вычислении геомагнитного индекса из 30 суток, предшествовавших текущим суткам, выбирается пять наиболее магнитоспокойных дней, по осредненным по пяти суткам значениям геомагнитного поля определяется Sq -вариация и вычисляются отклонения значений текущих суток относительно значений для спокойного дня.

Отклонения от Sq -вариации преобразуются в локальный K -индекс, принимающий значения от 0 до 9 по квазилогарифмической шкале, которая индивидуальна для выбранного пункта наблюдений; это делается для нормирования частоты встречаемости разных по величине возмущений.

Выделение джерков. С целью снижения воздействия внешних источников на геомагнитные вариации при идентификации джерков среднемесячные значения вычисляются только по данным магнитной регистрации, выполненной в ночные и магнитоспокойные временные интервалы [273], с целью минимизации сезонных вариаций, берется разница между месячными значениями в моменты времени $t + 6$ месяцев и $t - 6$ месяцев [274].

Исследование суточных вариаций. С целью исследования ежедневной изменчивости суточной вариации для магнитоспокойных дней вычисляются значения ночного времени, т.е. базовые значения составляющей геомагнитного поля (средние значения ночного времени: 23 – 02 ч по местному времени). Базовое значение задается выражением: $B_0 = (B_{23} + B_{00} + B_{01} + B_{02}) / 4$, где B_{23} , B_{00} , B_{01} и B_{02} – часовые значения составляющей геомагнитного поля в 23, 24, 01 и 02 ч по местному времени соответственно. Это базовое значение вычитается из данных измерений для получения вариации компонент геомагнитного поля [452].

2.4. Оценка магнитовариационных параметров

Метод разделения сигнал-шум. В качестве оценки магнитовариационных параметров (магнитный типпер и магнитный тензор) в настоящей работе использовался метод разделения сигнал-шум [421]. Этому методу было отдано предпочтение, так как он позволяет подавлять шумы различных типов: некоррелированные шумы (аппаратурные, включая их дрейфы из-за влияния температуры), коррелированные (такие как помехи от электрифицированных железных дорог, индустриальные помехи), низкий уровень сигнала в "мёртвых" диапазонах. В основе метода разделения сигнал-шум лежит представление сглаженных магнитотеллурических функций в виде: $Z(\omega) = U(\omega)D(\omega)Z(\omega)^{1-D}$, где $Z(\omega)^{1-D}$ – передаточная функция для одномерной (1-D) модели (примерно равна единице для магнитного типпера), $D(\omega)$ – безразмерная гладкая функция искажений (ее применение приводит к более точной оценке передаточных функций), $U(\omega)$ – безразмерная гладкая корректирующая функция, ω – частота.

Вычисление передаточных функций осуществляется в ходе итерационного процесса. Процесс вычислений повторяется до тех пор, пока процент отбраковки данных будет меньше порогового значения (в настоящей работе 0,5%), а функция $U(\omega)$ не станет близкой к единице.

В настоящей работе при использовании метода Ларсена для фильтрации выбросов и точек рычага используются и Фурье преобразование, и вейвлет-преобразование. В ходе работы было получено, что при вычислении магнитовариационных параметров по данным наблюдений за вариациями геомагнитного поля на Геофизической обсерватории при одинаковом вычислительном времени второй метод фильтрации более эффективен. Кроме того, процедура фильтрации на основе вейвлет-преобразования имеет преимущество, поскольку данные анализируются на разных масштабных уровнях, и появляется возможность отфильтровывать по пороговому значению зашумленные данные, при этом никак не искажая данные других сегментов.

Численное магнитотеллурическое моделирование. При численном моделировании изменения величины передаточной функции (магнитный типпер), обусловленного вариациями уровня подземных вод, применялся популярный в настоящее время метод магнитотеллурического моделирования с использованием неструктурированных тетраэдрических сеток. При создании сетки использовалось специальное программное обеспечение TetGen. В работе расчет проводился по описанному в серии статей [386-388] алгоритму вычисления параметров электромагнитного поля с использованием неструктурированных тетраэдрических сеток (сетка Вороного) с применением калибровочного условия Кулона. Гармоническое уравнение Гельмгольца в терминах электромагнитных потенциалов вместе с уравнением сохранения заряда дискретизируется на шахматных тетраэдрических сетях Вороного с помощью метода конечных объемов. В результате получается система уравнений, решением которой являются проекция векторного потенциала вдоль ребер и величина скалярного потенциала в узлах тетраэдрических элементов. Для решения системы уравнений в настоящей работе использовалось специализированное программное обеспечение ("решатель") MUMPS (Multifrontal Massively Parallel sparse direct Solver) [196].

Поскольку в работе исследуется влияние изменения уровня водоносного горизонта, размеры расчетной области (100 м x 100 м x 40 м) определялись глубиной его залегания. В модели горизонтальные слои соответствовали структурным слоям

геологического разреза вблизи скважины (рисунок 2.8), где проводится измерение уровня подземных вод (электропроводность суглинка принималась равной 100 Ом·м, известняка – 400 Ом·м, известняка, чередующегося с глиной, – 80 Ом·м, глины – 200 Ом·м, подземных вод – 1 Ом·м). Значения полей определялись в середине модели.

2.5. Обработка данных при совместном анализе геомагнитных импульсов и сейсмических колебаний

Обработка данных магнитометра. На первом этапе путем визуального просмотра данных производился отбор участков записи магнитометра, на которых наблюдалась повышенная магнитная активность (локальный индекс магнитной активности K , равный или больше 3). Предполагалось, что пикообразные (импульсные с резким ростом амплитуды) вариации геомагнитного поля с большей вероятностью оказывают влияние на микросейсмические колебания. По этой причине анализировались участки записи, содержащие такие события. В результате обработки цифровых рядов определялись амплитуды пикообразных геомагнитных вариаций относительно фоновых значений B , которые определялись как среднеквадратическое значение за период 1 – 2 ч, предшествующий анализируемой геомагнитной вариации. При этом использовались значения амплитуды положительного импульса, как разности $B = B_I - B_T$, где B_I и B_T – максимальный в импульсе и средний за час перед импульсом модули горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции, соответственно. Величина B принимала значения от ~ 10 до ~ 300 нТл при скорости изменения магнитного поля в диапазоне 20 – 600 нТл/ч.

Обработка данных сейсмоприемника. В качестве значений амплитуды наведенных вариаций сейсмического фона v выбирался максимум сглаженных вариаций модуля вектора амплитуды сейсмических колебаний в периоды времени геомагнитного возмущения (с целью определения возможного запаздывания реакции сейсмического фона на геомагнитное возмущение длительность участка записи многократно превышала длительность геомагнитного импульса). Значения v находились в диапазоне 0,03 – 0,3 мкм/с.

Выделение наведенных вариаций микросейсмического фона осуществлялось на основе спектрально-временного анализа (СВАН), заключающегося в оценке текущего спектра части временного ряда, соответствующего скользящему временному окну [79]. При этом спектры вычисляются на скользящих временных отрезках (временное окно).

При такой оценке получается зависимость спектра временного ряда, как от частоты, так и от времени, соответствующим середине окна. Эта зависимость визуализируется в виде либо цветowych двумерных уровней, либо трехмерных рельефов (СВАН-диаграмм). Максимальным значениям такой зависимости соответствуют временные интервалы увеличения амплитуды колебаний в тех или иных частотных полосах. Отметим, что визуализация спектра в виде СВАН-диаграмм позволила хорошо выделить повышенные амплитудные вариации сейсмического фона, вызванные геомагнитными импульсами.

2.6. Анализ связей между временными рядами

Построение кривой зависимости. В настоящей работе используется улучшенный метод наименьших квадратов, разработанный для построения кривой зависимости экспериментальных данных, загрязненных случайной ошибкой [679]. Локальные аппроксимации методом наименьших квадратов учитывают только ошибку зависимой переменной, тогда как независимая переменная экспериментальных данных всегда содержит случайную ошибку. Введение при локальных аппроксимациях в улучшенном методе наименьших квадратов параметра, основанного на сингулярном разложении, позволило улучшить аппроксимацию экспериментальных данных.

Корреляционный анализ. В качестве математического аппарата для установления связи между двумя временными рядами $x(t)$ и $y(t)$ использован корреляционный анализ. В его основе лежит представление о том, что при изменении временного ряда $x(t)$ происходит закономерное изменение другого ряда $y(t)$. Оценка тесноты (силы) корреляционной зависимости связана с коэффициентом корреляции R (характеризует степень взаимосвязи двух временных рядов между собой) и коэффициентом детерминации R^2 (причинности), показывающим долю общей вариации одного временного ряда, обусловленного изменчивостью другого (при этом $1 - R^2$ вариаций временного ряда оказывается необъясненной изменениями временного ряда x) [68, 685].

В настоящей работе оценки тесноты (силы) связи между двумя рядами проводились с использованием трех методов: вычисление коэффициента линейной корреляции Пирсона, коэффициентов ранговой корреляции Кендалла и Спирмена [399, 514, 582, 685]. Каждый из этих методов имеет свои специфические ограничения и преимущества, применение трех методов дает возможность использовать преимущества одного для преодоления ограничений другого, так что они дополняют друг друга.

С целью подтверждения статистической значимости корреляционной зависимости между двумя рядами данных использовался метод анализа с привлечением суррогатных рядов данных, для создания которых использовался известный код в среде Matlab [473]. Указанный метод предполагает вычисление Фурье-преобразования исходных (оригинальных) рядов данных. Затем вычисляются обратные преобразования Фурье суррогатных рядов данных, амплитуды которых случайным образом приписываются фазам соответствующих прямых преобразований на основе рандомизации фазовых спектров (при этом полученные ряды линейно коррелированные с оригинальными рядами, характеризуются теми же средними значениями, дисперсиями и автокорреляционными функциями). Процедура выполняется N раз с получением набора разных суррогатных рядов данных. Полученные таким образом наборы суррогатных рядов анализируются на корреляцию с оригинальными рядами данных. Если коэффициенты корреляции оригинальных рядов не попадают в интервал значений коэффициентов корреляции суррогатных рядов, то можно говорить о корреляционной зависимости оригинальных временных рядов.

Для оценки возможного запаздывания в отклике одной величины при изменении другой вычислялась взаимная корреляционная функция, эта функция дает оценку силы возможной линейной связи между процессами наблюдений для каждого лага (сдвига по времени) [255].

Причинно-следственный анализ. В настоящей работе для исследования причинно-следственной связи между геофизическими полями использован тест причинности Грейнджера [358-359]. Согласно Грейнджеру изменение одной величины обуславливает изменение другой величины, если прошлые значения первой величины помогают предсказать текущие значения второй величины с учетом всей другой соответствующей информации. В тесте Грейнджера проверяется нулевая гипотеза "первая величина не является причиной изменения второй". Критерием принятия гипотезы является так называемое P -значение. Если P -значение меньше 0,05, то нулевая гипотеза отвергается. Одновременно проверяется также наличие противоположной причинно-следственной связи. Наличие двусторонней причинно-следственной связи может указывать на существование третьей величины, которая является реальной причиной изменения рассматриваемых двух величин.

Выводы к главе 2:

В главе описывается приборное оснащение Геофизической обсерватории "Михнево" Института динамики геосфер Российской академии наук, используемое в настоящей работе, и приводится краткое описание района Геофизической обсерватории "Михнево". Следует отметить, что местоположение обсерватории характеризуется удаленностью от крупных промышленных объектов, что позволяет регистрировать геофизические поля в отсутствие сильного техногенного влияния. Район исследования характеризуется наличием глубинной тектонической структуры, которая представлена Нелидово-Рязанской шовной зоной, что, вероятно, приводит к усилению энергетического обмена между физическими полями разной природы. Кроме того, в главе рассматриваются данные, привлекаемые в дополнение к данным, полученным на обсерватории "Михнево", на разных этапах исследования. Привлечение этих данных позволяет проверить достоверность полученных результатов.

В главе приводится описание используемых методов обработки и анализа временных рядов. В настоящей работе применялись современные методы вейвлет-анализа, спектрального анализа, сингулярный спектральный анализ, корреляционный анализ, статистические методы, методы численного моделирования, методы оценки магнитотеллурических функций, а также специфические алгоритмы, разработанные для обработки и анализа данных регистрации геофизических полей. По описанным в главе методам обработки и анализа временных рядов были разработаны программные коды в среде MatLab и на языке Fortran. Некоторые методики были адаптированы к поставленным задачам исследований и привлекаемым данным, в частности, в робастном методе вычисления магнитовариационных параметров применялась фильтрация не только на основе Фурье преобразования, но и на основе вейвлет-преобразования.

Большой объем экспериментальных исследований, использование поверенных средств измерений, современных компьютерных программ и методов обработки и анализа гарантирует достоверность полученных результатов.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

3.1. Длиннопериодные геомагнитные вариации

Вековая вариация геомагнитного поля. Анализ данных магнитного мониторинга на Геофизической обсерватории "Михнево" показал, что магнитное поле сильно изменяется со временем. Результаты регистрации вариаций геомагнитного поля, выполненной в географической системе координат (ось x направлена на географический север, y – на восток, z – вертикально вниз) за весь анализируемый период 2008 – 2017 гг. представлены на рисунке 3.1. Вид графиков свидетельствует о некоторой тенденции изменения магнитного поля Земли.

О наличии трендовой составляющей можно судить по характерному виду автокорреляционной функции, как очень медленно спадающей кривой. В качестве примера на рисунке 3.2 приведены результаты вычисления автокорреляционной функции для среднесуточных значений северной горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Оценка на основе сингулярного спектрального анализа с идентификацией трендовой составляющей методом низких частот (рисунок 3.3) показала, что трендовая составляющая для горизонтальной северной компоненты B_x геомагнитного поля плавно уменьшается в течение анализируемого периода и характеризуется слабо выраженными максимумами в периоды равноденствий и минимумами в периоды солнцестояний.

Трендовые составляющие горизонтальной восточной B_y и вертикальной B_z компонент геомагнитного поля на протяжении десяти лет имеют практически линейный вид. Отмеченный ход трендовых составляющих в течение анализируемого периода для вертикальной и горизонтальных компонент геомагнитного поля обусловлен их вековыми вариациями [140, 182, 536]. Максимумы вариаций северной горизонтальной компоненты B_x в периоды равноденствий и минимумы в периоды солнцестояний, вероятнее всего, связаны с изменениями гелиографической широты Земли при обращении Земли вокруг Солнца [283, 541]; с вариацией направления потока солнечного ветра относительно оси магнитного диполя Земли [207, 464, 480]; или / и с изменением угла между экваториальной плоскостью и солнечной экваториальной плоскостью в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат [505-506, 545, 579, 602].

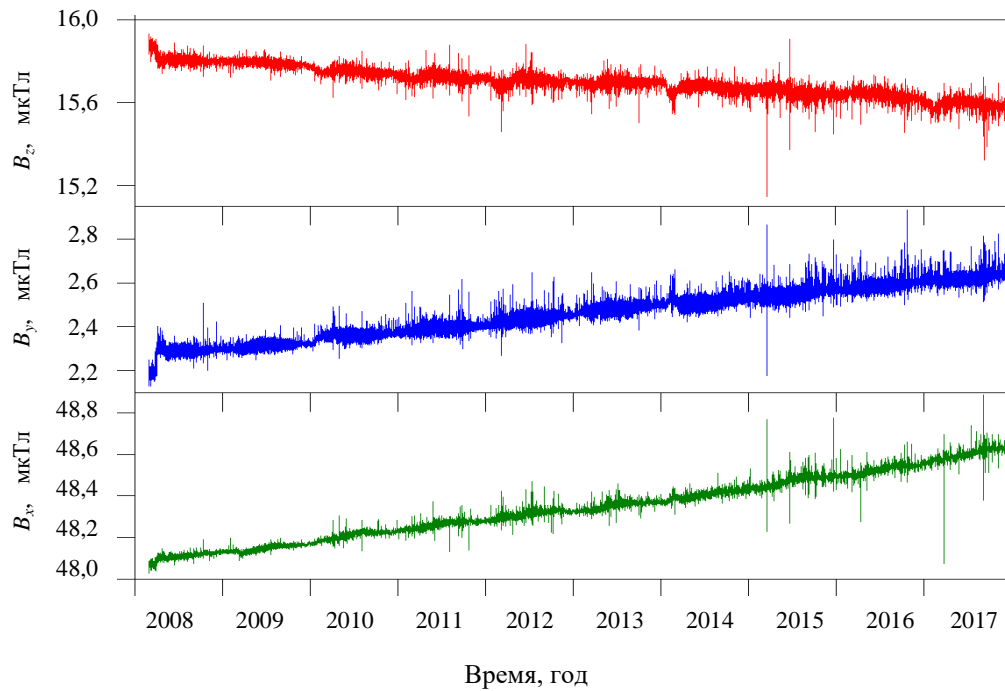


Рисунок 3.1 – Вариации компонент геомагнитного поля на обсерватории "Михнево" 26.02.2008 г. по 31.12.2017 г.

с

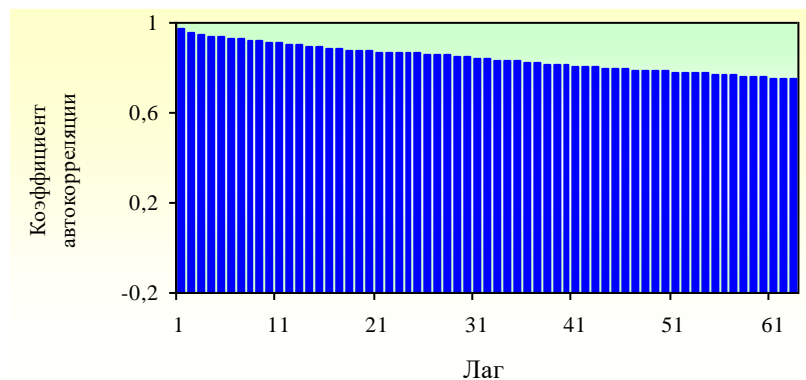


Рисунок 3.2 – Автокорреляционная (коррелограмма) функция данных регистрации индукции геомагнитного поля (компонента B_x) на обсерватории "Михнево" с 26.02.2008 г. по 31.12.2017 г.

Анализ данных инструментальных наблюдений за геомагнитными вариациями, регистрируемыми в других регионах, расположенных на средних широтах – Центральная геофизическая обсерватории "Бельск" Геофизического института Польской академии наук (рисунок 3.4); Геофизическая обсерватория "Борок" Института физики Земли Российской академии наук (рисунок 3.5); Магнитная обсерватория "Киев" Института геофизики Национальной академии наук Украины (рисунок 3.6) – показал, что отмеченные на обсерватории "Михнево" тенденции изменения вертикальной и горизонтальных компонент геомагнитного поля характерны в целом для средних широт.

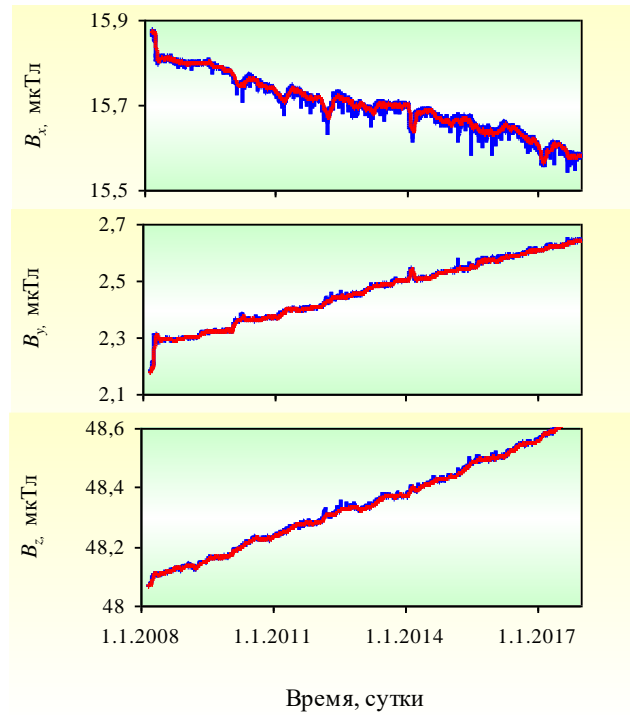


Рисунок 3.3 – Вариации среднесуточных компонент геомагнитного поля (синие линии) на обсерватории "Михнево" с 26.02.2008 г. по 31.12.2017 г. и трендовая составляющая (красные линии)

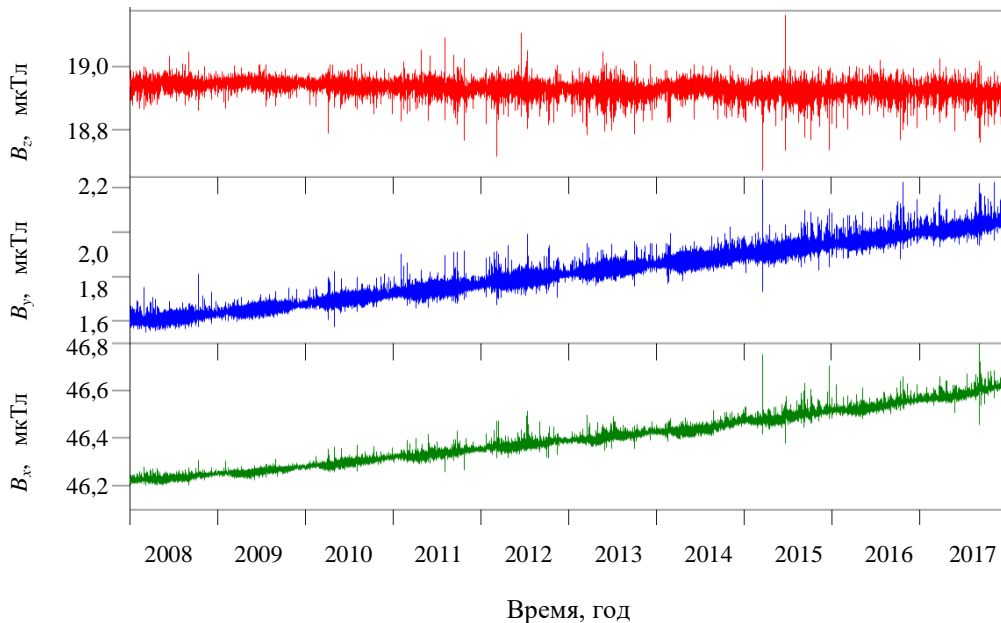


Рисунок 3.4 – Вариации компонент геомагнитного поля на Геофизической обсерватории "Бельск" за период с 01.01.2008 г. по 31.12.2017 г.

Для исследования эволюции векового изменения магнитного поля в настоящей работе вычислялись среднемесячные значения компонент геомагнитного поля по экспериментальным данным и среднегодовые значения с использованием модели *IGRF* 12-ого поколения (*IGRF-12*) [616]. Сопоставление среднемесячных значений вариаций геомагнитного поля на обсерватории "Михнево" и значений, рассчитанных по модели

для этого пункта наблюдений (рисунок 3.7), показало различие между рассчитанными и экспериментальными значениями, при этом ход графиков экспериментальных значений и теоретически рассчитанных схож.

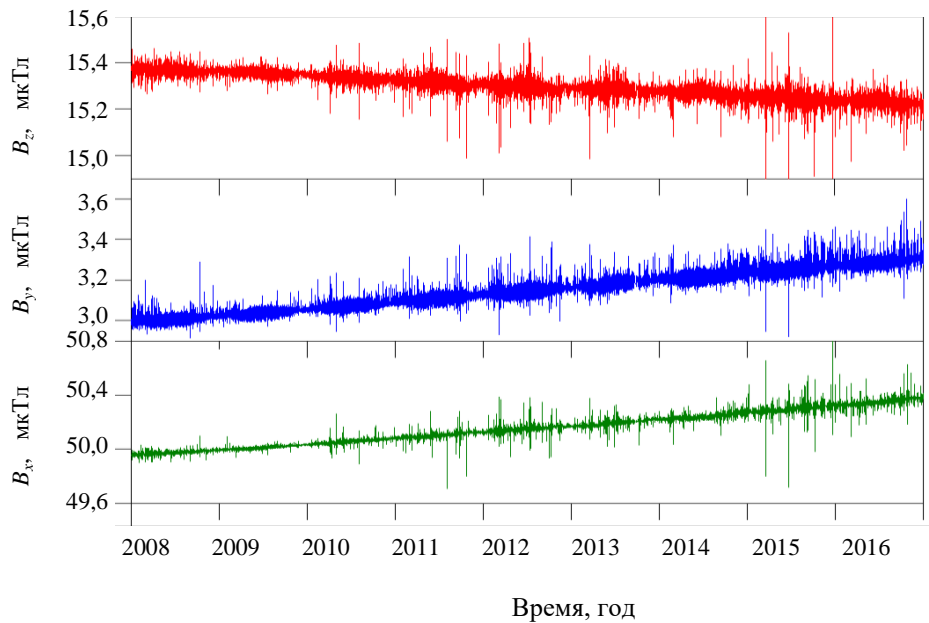


Рисунок 3.5 – Вариации компонент геомагнитного поля на Геофизической обсерватории "Борок" за период с 01.01.2008 по 31.12.2016 г.

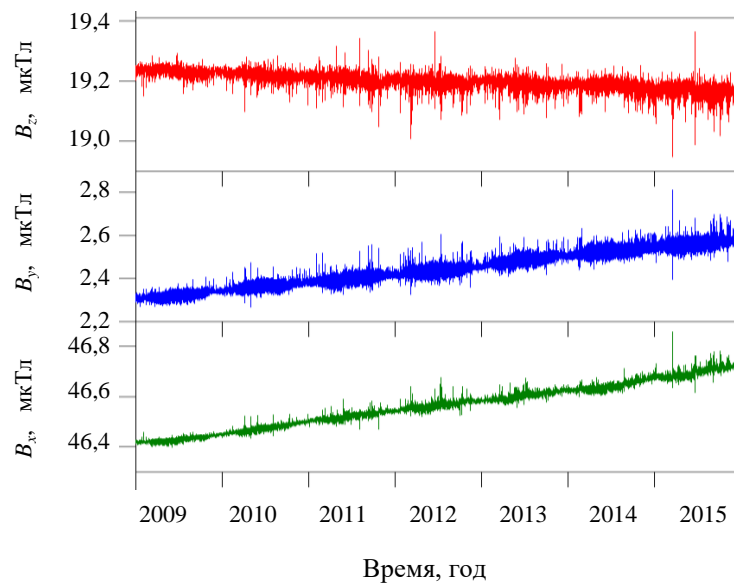


Рисунок 3.6 – Вариации компонент геомагнитного поля на Магнитной обсерватории "Киев" за период с 01.01.2009 г. по 31.12.2015 г.

Поскольку измеряемое геомагнитное поле B в приземном слое атмосферы определяется суммой различных полей источников [182, 536]: $B = B_n + B_a + B_s$, где B_n – нормальное (главное) магнитное поле Земли, генерируемое в ядре Земли; B_a – аномальное магнитное поле (литосферное поле), обусловленное неоднородно

намагниченными горными породами земной коры; B_e – возмущенное поле, обусловленное электрическими токами, текущими в верхней атмосфере и магнитосфере, которые также индуцируют электрические токи в водоемах, земной коре и мантии, можно предположить, что разница между рассчитанными по модели *IGRF* (главное поле) и экспериментальными значениями магнитного поля Земли на обсерватории "Михнево", главным образом, обусловлена литосферной составляющей геомагнитного поля. Это подтверждает совпадение значения и знака разницы между вычисленными по экспериментальным данным и рассчитанными по модели *IGRF* значениями полного вектора (-1267 нТл) с величинами аномального магнитного поля (составляет меньше -1000 нТл), определенными по карте аномального магнитного поля Московской области (рисунок 3.8).

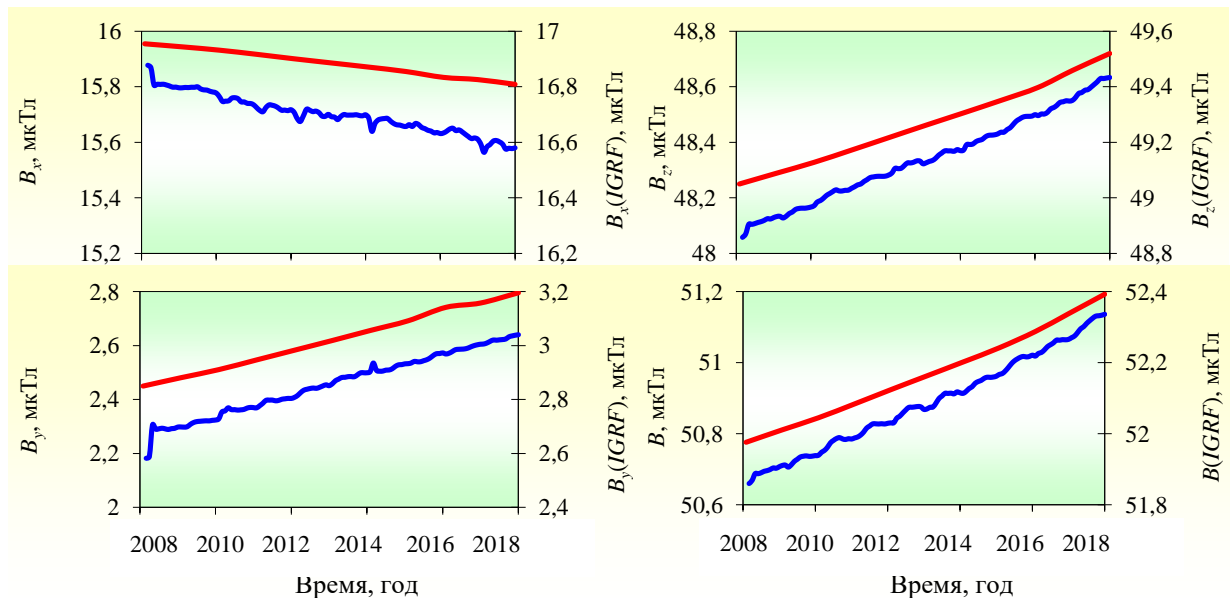


Рисунок 3.7 – Сопоставления среднесуточных значений вариаций магнитного поля и рассчитанных по модели *IGRF* на обсерватории "Михнево"

С целью подтверждения, что установленная на обсерватории "Михнево" разница между вычисленными по модели *IGRF-12* и экспериментальными значениями геомагнитного поля связана с аномальной составляющей, в настоящей работе привлекались данные ряда среднеширотных обсерваторий: Геофизические обсерватории "Бельск" и "Борок", Магнитная обсерватория "Киев". Анализ данных свидетельствует о том, что разница разного знака (отрицательная: в среднем 401 нТл для обсерватории "Борок", положительная: 362 нТл для обсерватории "Бельск" и 262 нТл для обсерватории "Киев") между рассчитанными по модели *IGRF-12* и вычисленными по

экспериментальным данным значениями полного вектора примерно соответствует величинам аномального магнитного поля, определенным по картам аномального магнитного поля Ярославской области [686], Украины [106], Польши [397, 518].

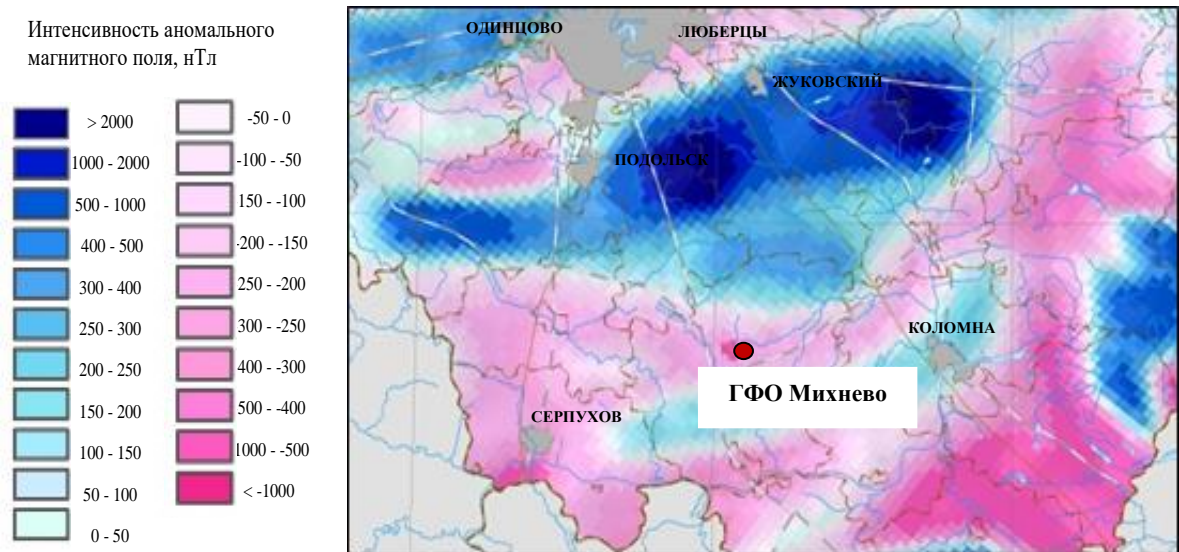


Рисунок 3.8 – Карта аномального магнитного поля Московской области (кружком отмечено местоположение Геофизической обсерватории "Михнево") [686]

На рисунке 3.9 приведены тренды первой производной компонент B_x , B_y и B_z геомагнитного поля, рассчитанных по среднегодовым значениям и по модели *IGRF* на обсерватории "Михнево". Изменение в наклоне производной (джерк) довольно ясно видно во всех компонентах в 2011 г. и 2014 г. Некоторое количество разброса из-за воздействия внешних источников присутствует, но оно не влияет на морфологию поведения вековой вариации. Также очевидно, что годы, близкие к солнечному максимуму, более загрязнены внешними эффектами по сравнению с годами, соответствующими солнечным минимумам. Такую же тенденцию можно наблюдать на обсерваториях "Бельск" (рисунок 3.9) и "Борок" (рисунок 3.10). Модель *IGRF-12* обеспечивает довольно хорошую согласованность с наблюдениями до 2014 года, но после 2014 года наблюдаются существенные различия между модельными и экспериментальными значениями вековой вариации. Выявленные в настоящей работе по данным среднеширотных обсерваторий "Михнево", "Борок" и "Бельск" джерки 2011 г. и 2014 г. ранее идентифицированы при исследовании вариаций компонент геомагнитного поля в регионах: Южная Атлантика/Африка, Европа и Северо-Западная Атлантика, а также Австралия с небольшими расхождениями по времени [271, 273,

332, 409, 413, 624]. Это дает основание предполагать глобальность выделенных в настоящей работе джерков.

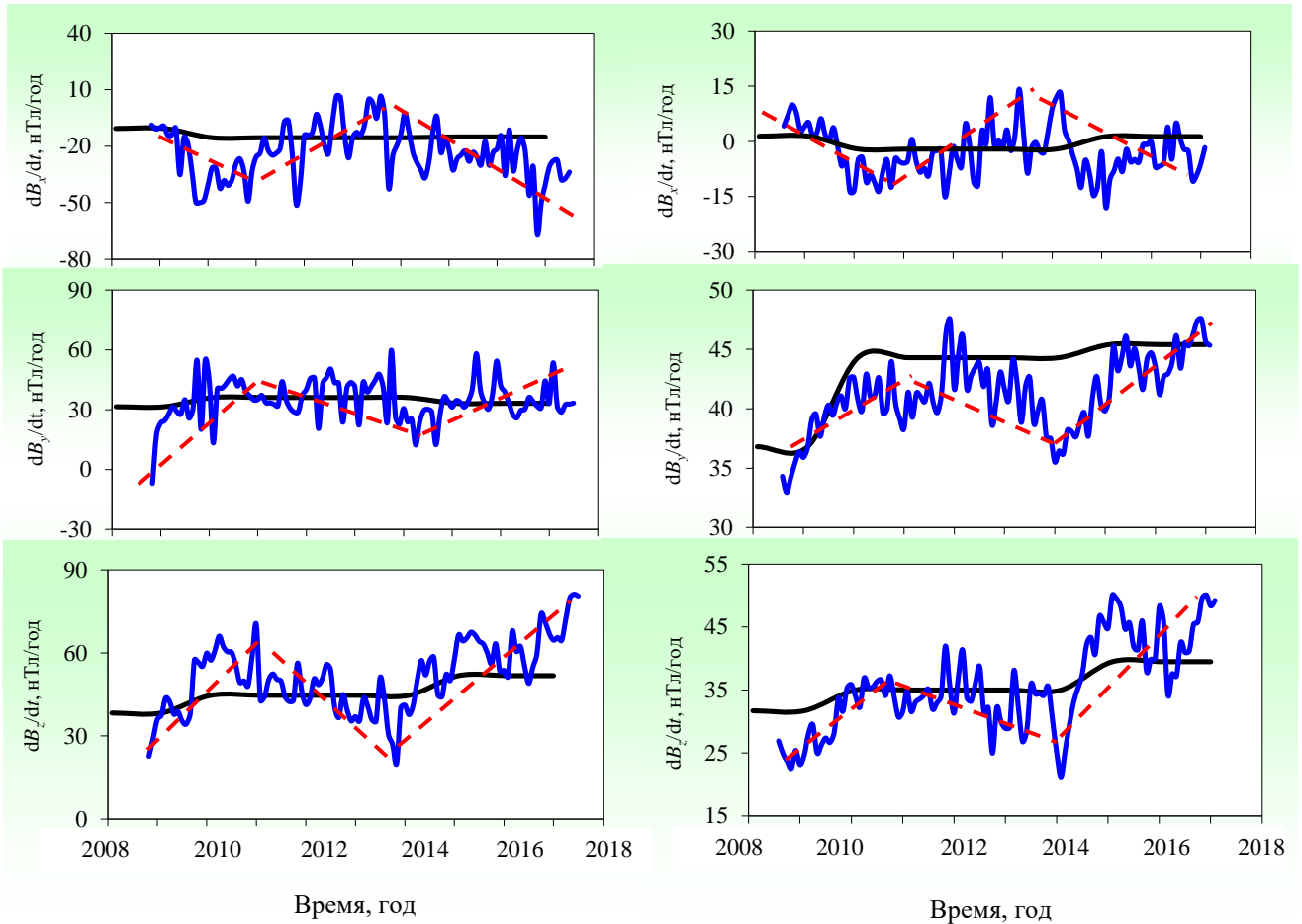


Рисунок 3.9. – Первая производная по времени среднемесячных вариаций геомагнитного поля (синяя линия) и вычисленная по модели *IGRF-12* (черная линия) на Геофизической обсерватории "Михнево" (слева) и на Геофизической обсерватории "Бельск" (справа) за период 2008 – 2017 гг. Штриховой красной линией показан наклон производной.

Особенности периодичностей геомагнитного поля. В настоящей работе изучались локальные длиннопериодные геомагнитные вариации с периодами $T \geq 1$ час. Анализ данных, полученных за весь период наблюдений, свидетельствует о сложном характере геомагнитных вариаций на обсерватории "Михнево". Анализ оценки спектральной мощности среднесуточных значений вариаций геомагнитного поля, приведенной в виде периодограмм на рисунке 3.11, показал, что для вариации горизонтальной северной компоненты B_x магнитного поля характерны полугодовая и годовая периодичности, 27-суточная периодичность с ее гармониками 6, 9, 13 – 14 суток, а также 60-суточная периодичность. На других компонентах эти периодичности проявляются слабее.

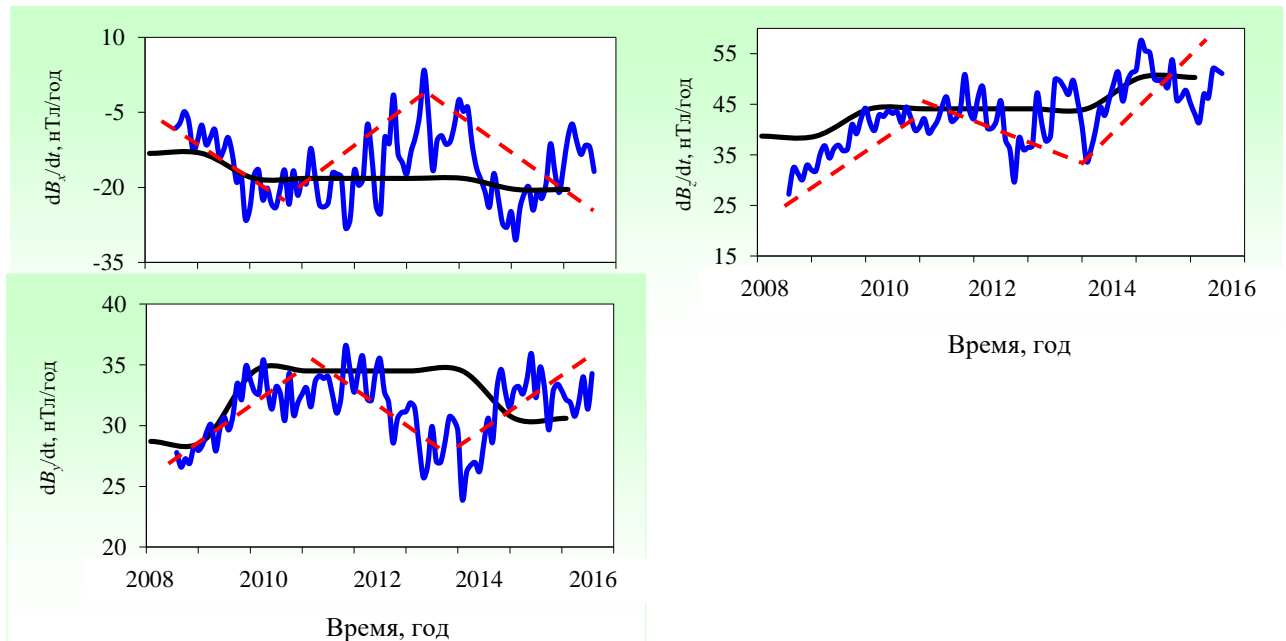


Рисунок 3.10. – Первая производная по времени среднемесячных вариаций геомагнитного поля (синяя линия) и вычисленная по модели *IGRF-12* (черная линия) на Геофизической обсерватории "Борок" за период 2008 – 2017 гг. Штриховой красной линией показан наклон производной.

Более детальную информацию о динамике периодических вариаций геомагнитного поля дают результаты вейвлет-анализа (модуль и фаза коэффициентов вейвлет-преобразования) за период 2010 – 2017 гг. (рисунок 3.12). Из представленных вейвлет-спектров (рисунок 3.12) и глобальных вейвлет-спектров (рисунок 3.11) видно, что выделяется несколько хорошо выраженных периодичностей в вариациях магнитного поля Земли. Вейвлет-спектры демонстрируют наличие вариаций с периодами, равными примерно 27 суткам, периодичностей с периодами $\sim 6 - 7$, $\sim 13 - 14$, 60 суток, а также наличие полугодовой и годовой периодичностей. Картина вейвлет-спектров амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования (рисунок 3.12) свидетельствует о подверженности 27-суточной периодичности и ее гармоник влиянию разномасштабных процессов и об изменчивости во времени интенсивности периодических вариаций.

Выявленные годовые вариации геомагнитного поля, играющие важную роль в процессах взаимодействия между солнечным ветром, магнитосферой и ионосферой, могут быть обусловлены: изменением освещенности Земли при ее вращении вокруг Солнца [286]; асимметричным распределением скорости солнечного ветра по гелиографическому экватору [682]; широтным движением аврорального электроджета

или кольцевого тока [441, 446]. Для объяснения полугодовой вариации геомагнитного поля можно привлечь одну из основных существующих в настоящее время гипотез: аксиальную гипотезу [283, 541], равноденственную гипотезу [207, 464, 480], механизм Рассела-Макферрона [505-506, 545, 579, 602]. Механизм генерации обнаруженной периодичности, около 60 суток, до сих пор не вполне ясен. Периодические вариации с периодами 9 и 6 суток связаны с флуктуациями силы кольцевого тока магнитосферы [203], с секторной структурой межпланетного магнитного поля [185, 664], со временем нарастания энергии в зоне корональных дыр [641], с асимметрией солнечного динамо [434, 474], или с периодичностью солнечного ветра, вызванной распределением коронарных дыр по солнечной долготе [429].

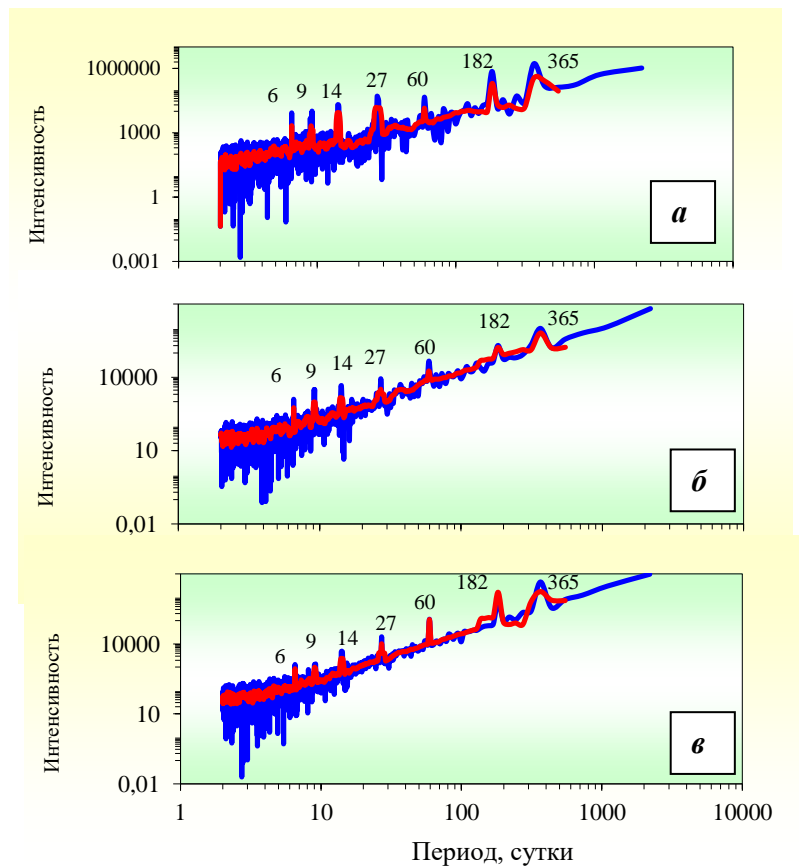


Рисунок 3.11 – Периодограммы (синие линии) и глобальные вейвлет-спектры (красные линии) среднесуточных значений геомагнитных вариаций ($a - B_x$, $b - B_y$, $v - B_z$) на обсерватории "Михнево" с 01.03.2008 г. по 31.12.2017 г.

Из выделенных периодичностей геомагнитного поля в работе особый интерес представляют двухнедельная и 27-суточная периодичности геомагнитных вариаций. С большой вероятностью обе эти периодичности могут быть связаны с движениями в системе Земля – Луна. Периодичность 13 – 14 суток обычно объясняется или двумя потоками солнечного ветра за один период Каррингтона [275, 438, 481], или секторной

структурой межпланетного магнитного поля [351]. Наличие этой периодичности можно объяснить характерным периодом движения системы Земля – Луна вокруг ее центра масс. Отчетливо проявляющаяся 27-суточная периодичность, которую традиционно связывают с обращением Солнца вокруг своей оси [223, 575, 576], также может иметь составляющую, которая определяется периодом движения Луны вокруг Земли (сидерический лунный цикл или близкий к нему драконический лунный цикл).

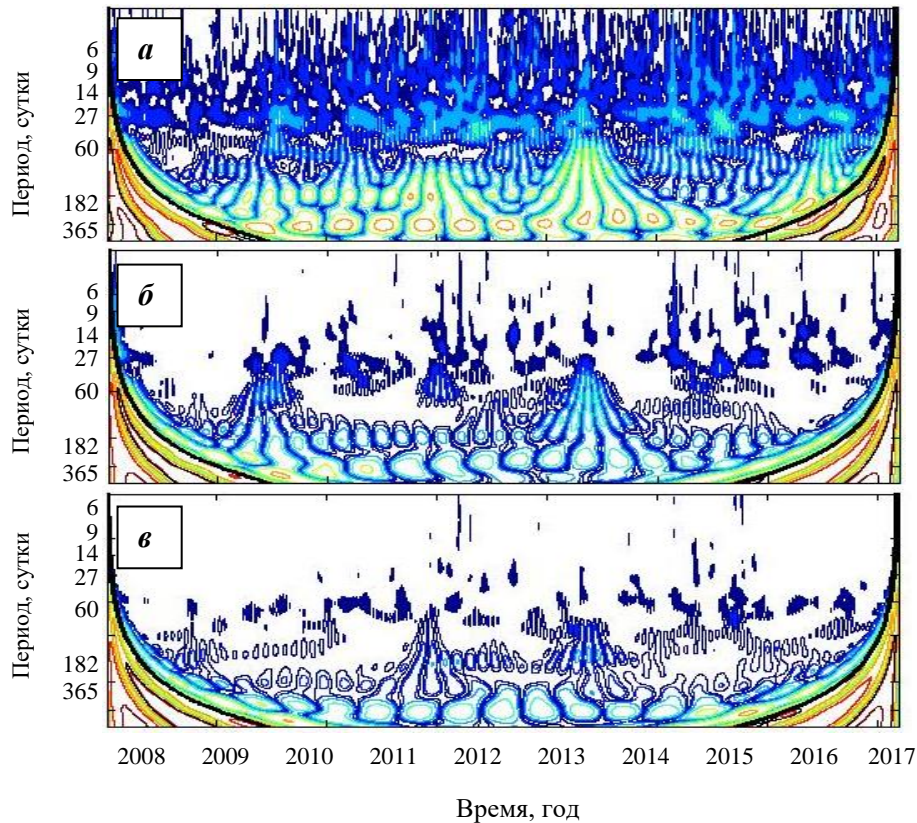


Рисунок 3.12 – Результаты вейвлет-анализа (амплитуда) геомагнитных вариаций ($a - B_x$, $b - B_y$, $v - B_z$) на обсерватории "Михнево" с 01.03.2008 г. по 31.12.2017 г.

С целью исследования воздействия Луны на геомагнитные вариации был проведен детальный спектральный анализ в диапазоне периода и полупериода Каррингтона (27,2753 сут), результаты приведены на рисунках 3.13 и 3.14. Анализ спектра, представленного на рисунке 3.13, позволил выделить ряд симметрично расположенных спектральных гармоник относительно пика, соответствующего периоду обращения Солнца 1. Спектральные гармоники 2, 3 с периодами 27,09 и 27,46 сут, соответственно, равноотстоят от пика 1 на 0,00025 1/сут, и это соответствует модуляции 27-суточной периодичности 11-летним циклом. Наличие в спектре в диапазоне периода Каррингтона спектральных гармоник 4, 5 с периодами 25,38 и 29,48 сут, можно объяснить амплитудной модуляцией периодом год, а пики 6 и 7 с периодами 23,73 и

32,07 сут – модуляцией периодом полгода. Аналогичным образом можно установить амплитудную модуляцию двухнедельной периодичности. Действительно, рассматривая спектры, приведенные на рисунке 3.14, получаем, что геомагнитные вариации с периодом, равным полупериоду солнечного вращения (пик 1 с периодом 13,66 сут), модулируются 11-летним циклом (пики 2 и 3 с периодами 13,60 и 13,70 сут), периодом год (пики 4 и 5 с периодами 13,15 и 14,17 сут) и периодом полгода (пики 6 и 7 с периодами 12,69 и 14,75 сут).

Таким образом, можно констатировать, что геомагнитные вариации на обсерватории "Михнево" с периодами, равными периоду и полупериоду Каррингтона, модулируются 11 летним, годовым, полугодовым периодами, что вполне соответствует результатам предыдущих исследований модуляции 27-суточной периодичности [250, 280, 559-561, 594].

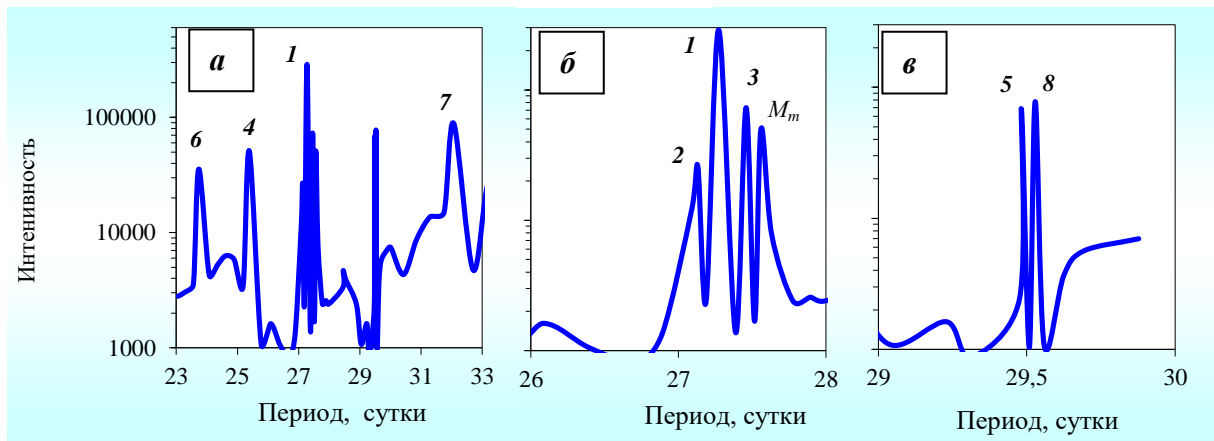


Рисунок 3.13 - Периодограммы геомагнитных вариаций в области 27 – 33 суток (а), 26 – 28 суток (б), 29 – 30 суток (в) на обсерватории "Михнево"

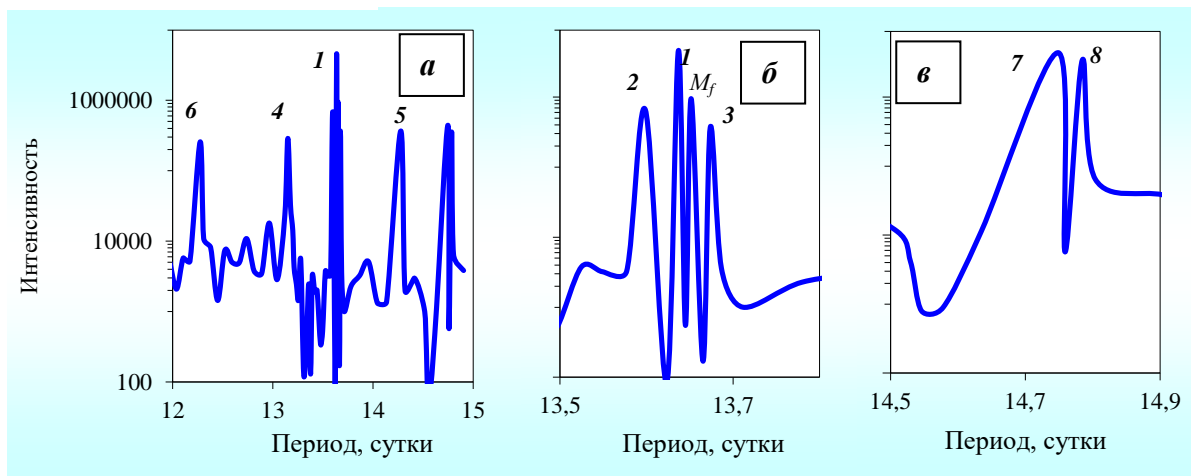


Рисунок 3.14 – Периодограммы геомагнитных вариаций в области 12 – 15 суток (а), 13,5 – 13,8 суток (б), 14,5 – 14,9 суток (в) на обсерватории "Михнево"

В спектрах, приведенных на рисунках 3.13 и 3.14, можно идентифицировать еще несколько спектральных гармоник, которые не объясняются амплитудной модуляцией. Учитывая, что лунно-солнечный прилив может оказывать влияние на геомагнитные вариации [190, 205, 214, 218, 468, 528, 590-591, 595], можно предположить, что наличие этих гармоник может быть обусловлено его воздействием. Гипотеза о приливном влиянии подтверждается совпадением спектральных гармоник (периодограммы геомагнитных вариаций, содержащие эти приливные волны, приведены на рисунках 3.13 и 3.14) с периодами приливных волн: лунной эллиптической волны (M_m) с периодом аномалистического месяца (27,55 сут) и лунной деклинационной волны (M_f) с периодом половины тропического месяца (13,66 сут), а также лунно-солнечных приливов с периодами половины (14,76 сут – интервал между сизигийными приливами при новолунии и полнолунии) (пик 8 на рисунке 3.14) и целого (29,53 сут) синодического месяца (пик 8 на рисунке 3.13). Однако, механизм воздействия этих приливных волн не вполне ясен. Здесь следует отметить, что с учетом того, что внутри Земли между внутренним твердым ядром и мантией, представленной высоковязким веществом, находится слой, содержащий электропроводящую жидкость (внешнее ядро), с вязкостью, приближающейся по некоторым оценкам к вязкости воды [64, 141, 348], следует ожидать, что постоянно изменяющееся во времени воздействие лунно-солнечного прилива на такую сложно построенную систему вызывает периодические изменения в вихревых движениях жидкого вещества во внешнем ядре Земли, что приводит к вариации токовых систем в жидком ядре [64, 176]. В качестве механизма влияния лунного прилива на геомагнитные вариации на поверхности Земли можно рассматривать, например, изменение токовых систем в земной коре в результате гравитационного воздействия Луны, которое вызывает изменение пустотности земного вещества в приливном горбе. При этом следует добавить, что эффект существенно усиливается в зонах тектонических нарушений, где происходит концентрация деформаций земного вещества [7].

Анализ данных регистрации магнитного поля, выполненной в других районах в условиях средних широт (Геофизическая обсерватория "Бельск" за период 2008 – 2017 гг., Геофизическая обсерватория "Борок" за период 2008 – 2016 гг., Магнитная обсерватория "Киев" за 2009 – 2015 гг.) показал, что в целом для геомагнитных вариаций в средних широтах характерны годовые и полугодовые периодичности, 60-

суточные периодичности, а также 27-суточные периодичности с гармониками 6, 9, 13 – 14 суток (рисунки 3.15 и 3.16), причем последняя периодичность и ее двухнедельная гармоника имеют мультифрактальный характер.

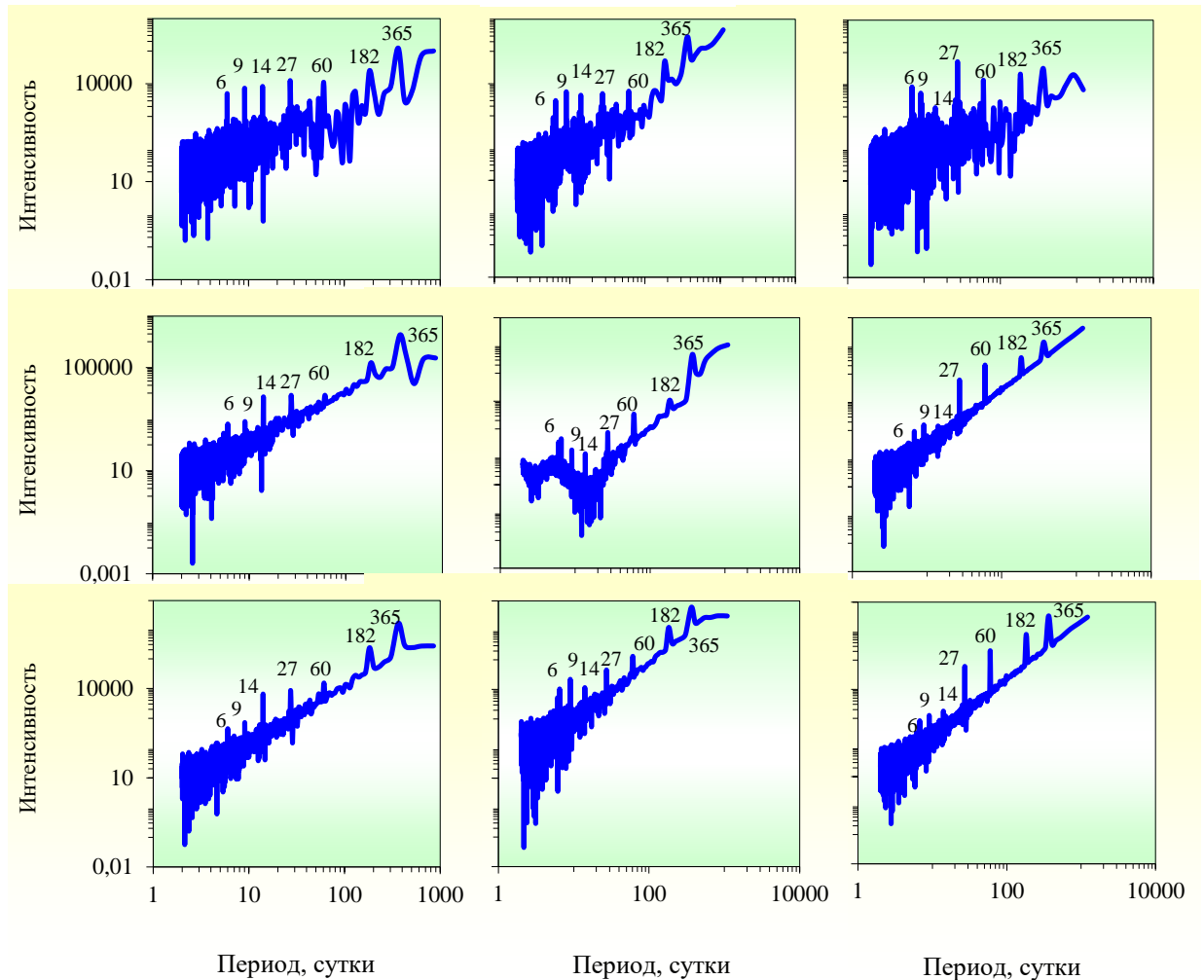


Рисунок 3.15 – Периодограммы среднесуточных значений вариаций геомагнитного поля (верхняя панель – B_x , средняя панель – B_y , нижняя панель – B_z) на обсерватории "Киев" за 2009-2015 гг. (слева), на обсерватории "Борок" за период 2008 – 2016 гг. (посередине) и на обсерватории "Бельск" за период 2008 – 2017 гг. (справа)

Спектральный анализ геомагнитных вариаций в диапазонах периода и полупериода вращения Солнца (период Каррингтона) подтверждает модуляцию геомагнитных волн 11-летним, годовым, полугодовым периодами и действием лунно-солнечного прилива. В качестве примера на рисунках 3.17 и 3.18 приведены периодограммы для Геофизической обсерватории "Бельск". Спектральные гармоники 2 (27,10 сут) и 3 (27,47 сут) на периодограммах, представленных на рисунке 3.17, обусловлены модуляцией периода примерно 27,275 сут, равного периоду обращения Солнца вокруг оси (пик 1), 11-летним циклом. Гармоники 4 (25,36 сут), 5 (29,47 сут),

вероятно, связаны с модуляцией полгода этого же периода периодом год, а гармоники 6 (23,72 сут) и 7 (32,05 сут) – модуляцией периодом полгода. Анализ периодограмм на рисунке 3.18 продемонстрировал, что для геомагнитных вариаций с периодом, равным полупериоду солнечного вращения (пик 1 с периодом 13,66 сут) также характерна модуляция 11-летним циклом (пики 2 и 3 с периодами 13,59 и 13,68 сут), периодом год (пики 4 и 5 с периодами 13,15 и 14,17 сут) и периодом полгода (пики 6 и 7 с периодами 12,7 и 14,74 сут). Кроме того, в обоих диапазонах есть гармоники, которые нельзя объяснить модуляцией, но они хорошо согласуются с периодами лунно-солнечного прилива, а именно с периодом лунной эллиптической волны (M_m), лунной деклинационной волны (M_f) с периодом половины тропического месяца (13,66 сут), а также лунно-солнечных приливов с периодами половины (пик 8 на рисунке 3.17) и целого синодического месяца (пик 8 на рисунке 3.18).

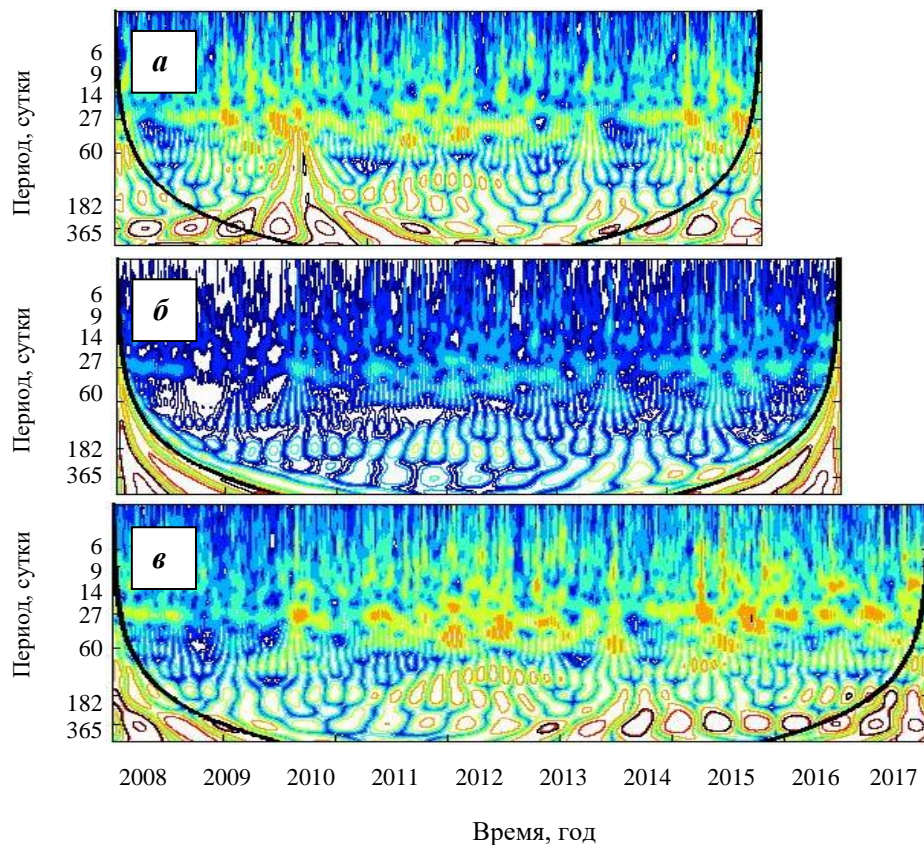


Рисунок 3.16 – Амплитуда вейвлет-преобразования среднесуточных значений вариаций геомагнитного поля (B_x -компонента) на обсерватории "Киев" за 2009 – 2015 гг. (а), на обсерватории "Борок" за период 2008 – 2016 гг. (б) и на обсерватории "Бельск" за период 2008 – 2017 гг. (в)

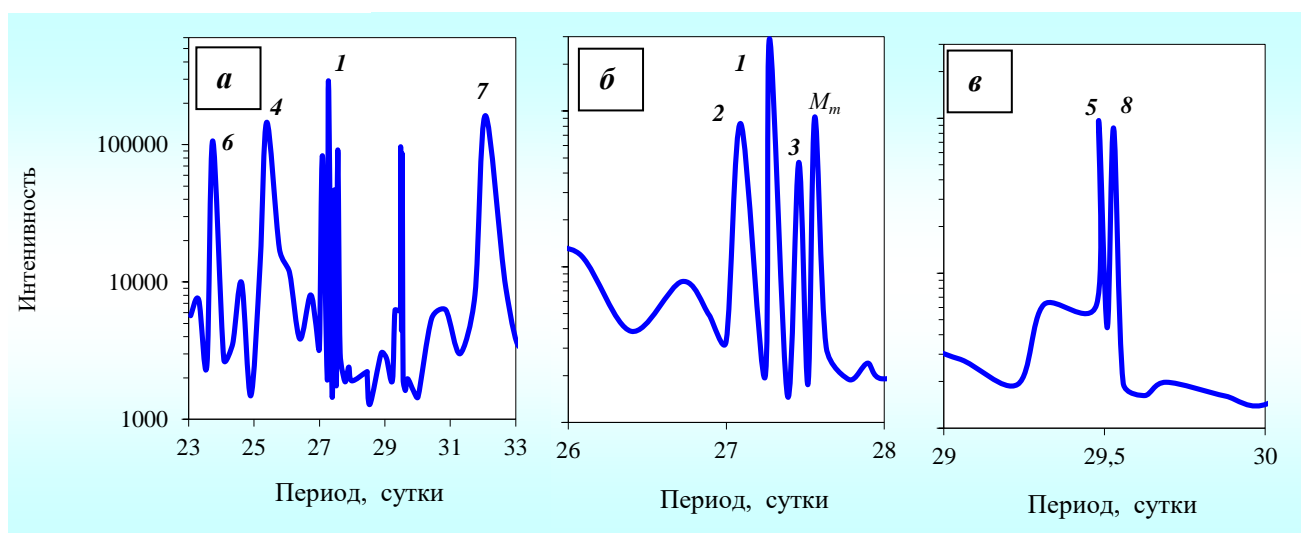


Рисунок 3.17 - Периодограммы геомагнитных вариаций в области 27 – 33 суток (а), 26 – 28 суток (б), 29 – 30 суток (в) на обсерватории Бельск"

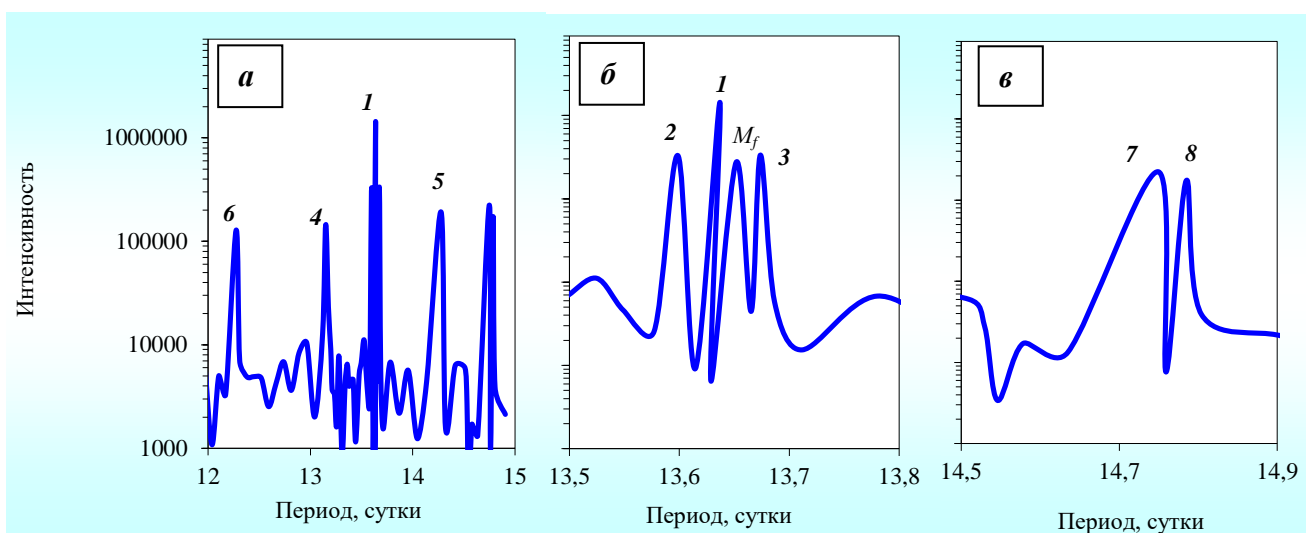


Рисунок 3.18 – Периодограммы геомагнитных вариаций в области 12 – 15 суток (а), 13,5 – 13,8 суток (б), 14,5 – 14,9 суток (в) на обсерватории "Бельск"

Анализ картины вейвлет-преобразования, приведенной на рисунке 3.19, демонстрирует, что периодические вариации геомагнитного поля на Геофизической обсерватории "Михнево" формируются в результате разномасштабных процессов, интенсивность которых не остается постоянной во времени, а претерпевает сильные изменения. Если отбросить те интервалы времени, где наблюдаются мощные геомагнитные вариации, связанные с магнитными бурями, то можно отметить, что для периодических вариаций характерен мерцательный (спорадический) характер. Наблюдаются периоды, когда можно четко выделить периодичности (для представленной на рисунке 3.19 картины февраль – начало марта и начало августа) и

перемежающиеся с ними периоды, характеризующиеся слабо выраженной периодичностью (вторая половина марта) и т.д. Отмеченная особенность геомагнитных вариаций представляет определенный интерес для дальнейших исследований и свидетельствует о сложных процессах формирования и деградации источников геомагнитных вариаций на средних широтах.

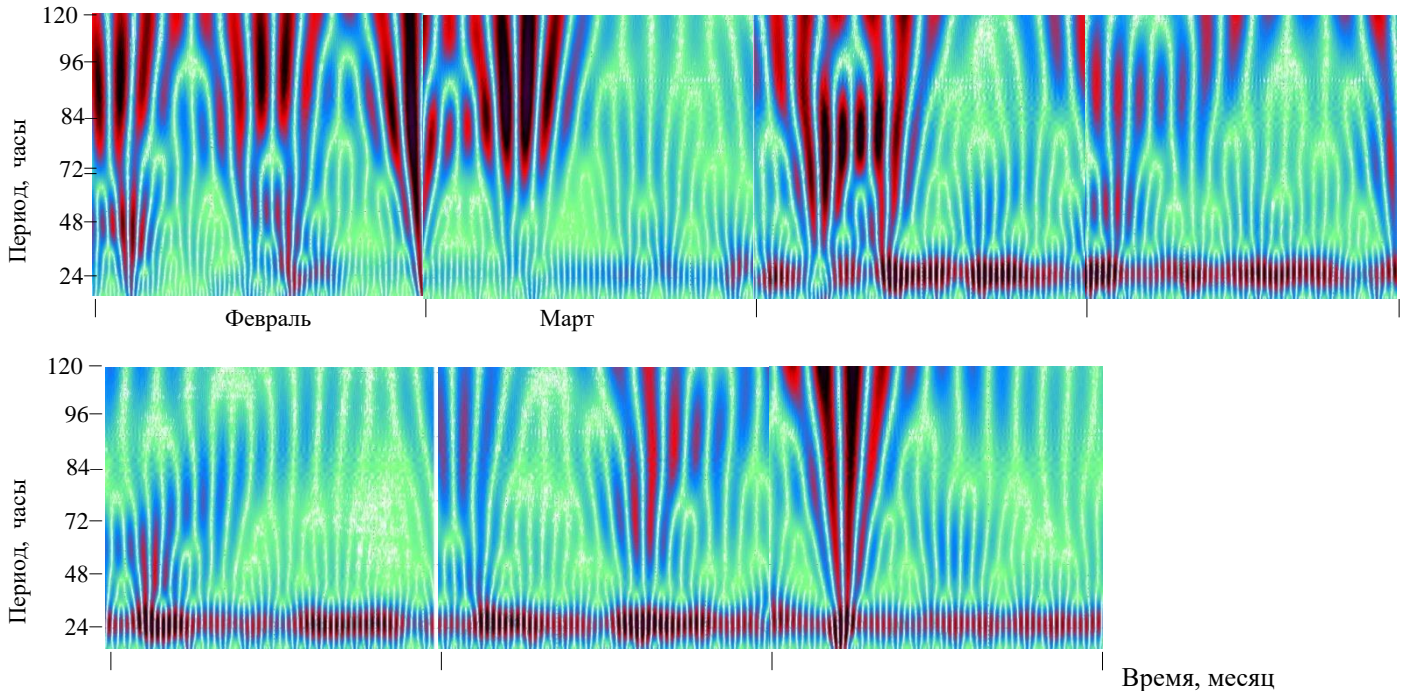


Рисунок 3.19 – Модуль вейвлет-коэффициентов геомагнитных вариаций (компонента B_x) на обсерватории "Михнево" за период февраль – август 2011 г. в диапазоне 0,1 – 6 сут. в пределах конуса влияния

Еще одной особенностью наблюдаемых периодичностей геомагнитных вариаций является их фрактальный характер. Приведенные на рисунках 3.19, 3.20 картины модуля вейвлет-коэффициентов в пределах конуса влияния демонстрируют иерархическую структуру геомагнитных вариаций. При этом хорошо просматриваются линии локальных максимумов. Дробление масштаба отмечается появлением в распределении коэффициентов характерных "вилочек" – раздвоением локальных максимумов: каждая из линий, характеризующих положение локальных максимумов, раздваивается, расходясь на два независимых локальных максимума. Это повторяется с увеличением масштаба, свидетельствуя о самоподобии процесса [9]. Выполненный анализ самоподобных свойств геомагнитного поля на обсерватории "Михнево" на основе картины вейвлет-коэффициентов носит, в основном, качественный характер.

Дальнейший анализ скейлинга проводился на основе метода максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования. В качестве примера рассмотрим результаты анализа для вариаций геомагнитного поля в магнитоспокойные дни за 2009 г. (год, характеризующийся самой низкой геомагнитной активностью), среднечасовые значения были отфильтрованы в полосе частот 1 сутки. На рисунке 3.21 представлена зависимость статистических сумм $Zq(s)$ от масштаба декомпозиции s при различных значениях моментов q в двойных логарифмических координатах, аппроксимация которой линейной зависимостью дает значение показателя Херста: $D(h) = 1,45$. Так как монофрактал имеет узкий спектр фрактальных размерностей, а мультифрактал характеризуется уширением данного спектра, ширина спектра $\Delta h \approx 0,21$, приведенного на рисунке 3.22б, свидетельствует о почти монофрактальном характере суточной вариации магнитного поля Земли. Это подтверждает и практически линейный вид кривой скейлинговой функции $\tau(q)$ (рисунок 3.22а)

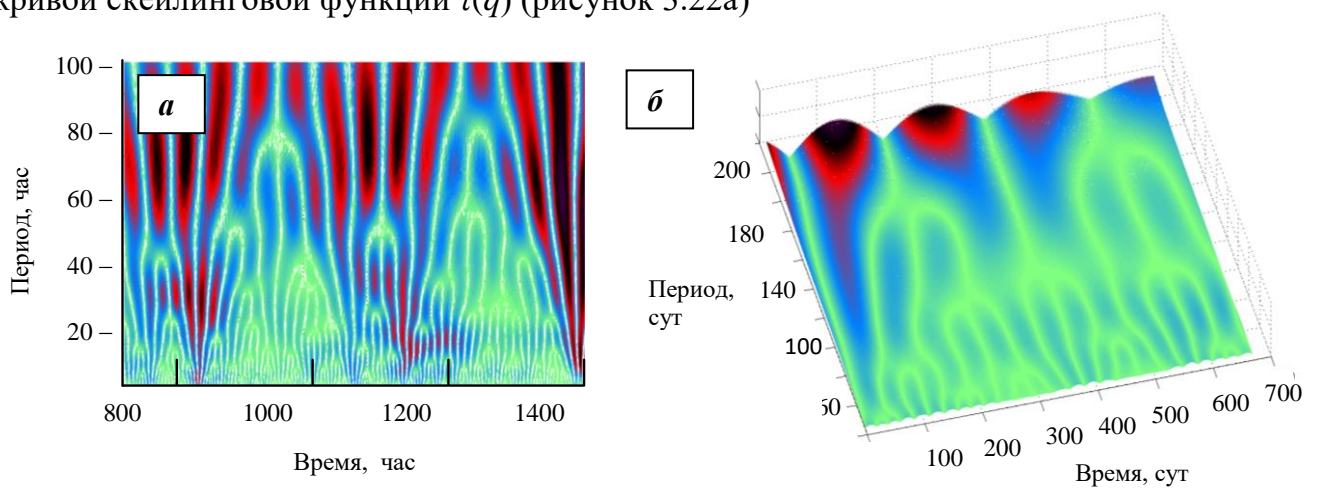


Рисунок 3.20 – Модуль коэффициентов вейвлет-преобразования геомагнитных вариаций (компонента B_x) за 2011 – 2012 гг. в диапазоне периодов 60 – 240 сут (а) и за февраль 2011 г. в диапазоне периодов 0,5 – 110 сут (б) на обсерватории "Михнево" в пределах конуса влияния

Анализ полученных результатов свидетельствует в пользу предположения о проявлении свойств монофрактальности суточной вариации геомагнитного поля, причем вне зависимости от солнечной активности (таблица 3.1). В целом, вариации геомагнитного поля не обладают простым монофрактальным поведением скейлинга, которое можно описать одной скейлинговой экспонентой, а характеризуются более сложным поведением скейлинга, которое можно описать только несколькими скейлинговыми экспонентами (мультифрактальное поведение). В отличие от суточной

вариации, 27-суточная вариация и ее гармоники показывают более высокую степень мультифрактальности во время максимума солнечной активности по сравнению с минимумом солнечной активности (таблица 3.1). Установленные в работе особенности скейлинга вариаций геомагнитного поля подтверждают исследования последних лет, показавшие, что в целом, вариации геомагнитного поля формируются под воздействием разномасштабных процессов, т.е. имеют мультифрактальный характер [364, 379, 633, 652]. В отсутствие возмущений суточные геомагнитные вариации характеризуются почти монофрактальным поведением, а во время возмущенных периодов наблюдается нестационарность [226, 281, 645, 651, 662, 678].

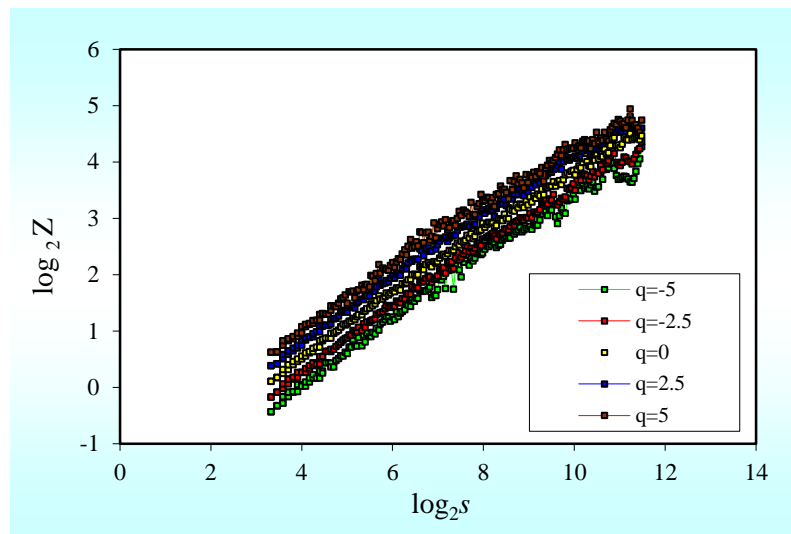


Рисунок 3.21 – Статистическая сумма $Zq(s)$ в зависимости от масштаба декомпозиции s при различных значениях моментов

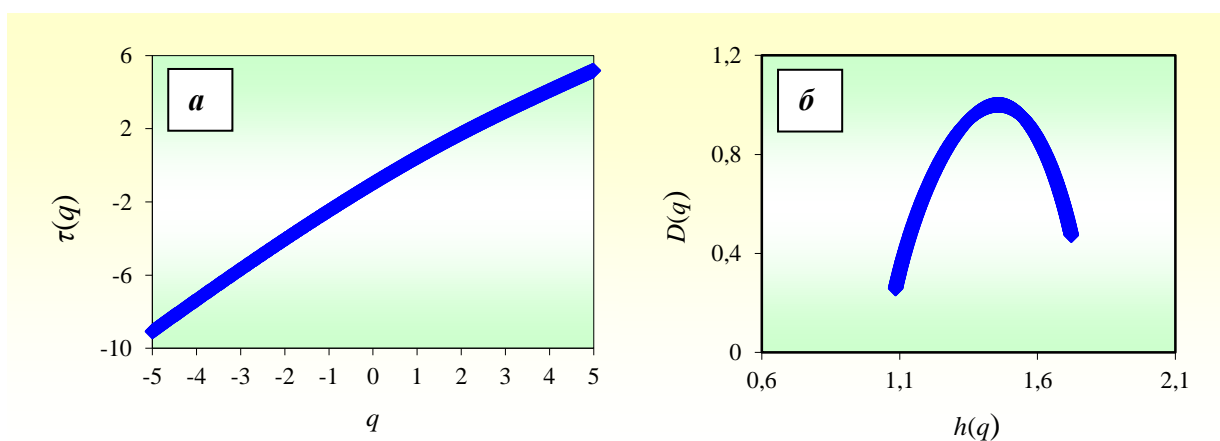


Рисунок 3.22 – Скейлинговые функции $\tau(q)$ (а) и спектры сингулярностей $D(h)$ (б) для суточных вариаций геомагнитного поля на обсерватории "Михнево"

Таблица 3.1. Сравнение ширины мультифрактального спектра для минимума солнечной активности (2008 г.) и максимума солнечной активности (2014 г.) на обсерватории "Михнево"

Период (сутки)	2008 г.	2014 г.
1	0,21	0,22
9	1,00	1,11
13,5	0,75	1,04
27	0,82	0,89

Итак, анализ данных свидетельствует о спорадическом и скейлинговом (близком к монофрактальному в случае суточной вариации) характере геомагнитных вариаций на Геофизической обсерватории "Михнево". Установленные на обсерватории "Михнево" особенности геомагнитных вариаций позволяют предполагать, что они, вероятнее всего, характерны для средних широт, следовательно, спорадический и скейлинговый характер геомагнитных вариаций, скорее всего, можно наблюдать и в других среднеширотных районах.

Проведенный в настоящей работе детальный анализ данных с Геофизических обсерваторий "Бельск", "Борок" и Магнитной обсерватория "Киев" (пример результатов которого приведен на рисунке 3.23) позволяет утверждать, что обнаруженный на Геофизической обсерватории "Михнево" эффект чередования периодов увеличения и деградации интенсивности геомагнитных вариаций (перемежаемость) также характерен и для этих районов, расположенных на средних широтах. Кроме того, периодичности геомагнитных вариаций на этих обсерваториях также проявляют тот же фрактальный характер (таблица 3.2), что и на обсерватории "Михнево". Таким образом, на этом этапе можно прийти к заключению, что установленные на обсерватории "Михнево" характеристики геомагнитных вариаций носят не локальный характер.

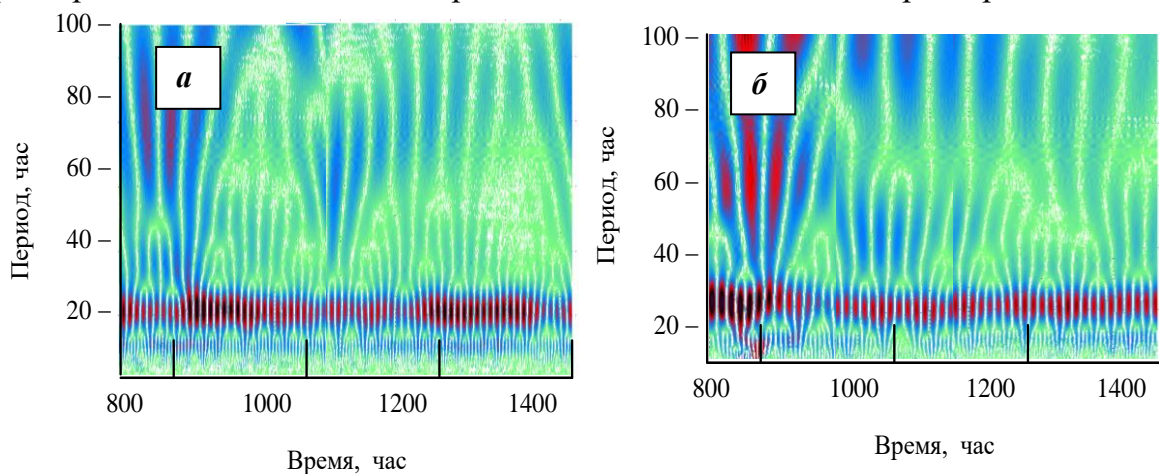


Рисунок 3.23 – Модуль коэффициентов вейвлет-преобразования геомагнитных вариаций (B_x компонента) на обсерватории "Борок" (а) и "Киев" (б) (март 2011)

Таблица 3.2. Сравнение ширины мультифрактального спектра для минимума солнечной активности (2008 г.) и максимума солнечной активности (2014 г.) на обсерваториях "Бельск", "Борок" и "Киев"

Период (сутки)	Бельск	Борок	Киев
	2008 г.		
1	0,17	0,15	0,21
9	1,09	1,00	1,02
13,5	0,77	0,95	0,94
27	0,87	0,86	0,92
	2014 г.		
1	0,21	0,14	0,19
9	1,11	0,99	0,97
13,5	0,70	0,87	1,16
27	0,82	0,91	0,99

Многообразие возможных источников, влияющих на локальное магнитное поле, приводит к тому, что геомагнитные вариации в разных частотных диапазонах могут иметь индивидуальные особенности. По этой причине, а также с целью установления источников возмущений, необходимо анализировать изменение во времени отдельных спектральных составляющих геомагнитных вариаций. При этом особый интерес вызывают их периодические вариации. В качестве примера на рисунке 3.24а – 3.24в представлены вариации амплитуды спектральных составляющих с периодами 1, 14 и 27 сут (данные за 2011 – 2012 гг.).

Как и в случае геомагнитных вариаций, усредненных по всему интервалу периодов, отдельные их спектральные составляющие также характеризуются периодичностями. Явно выделяются несколько характерных периодов. Например, график, приведенный на рисунке 3.24а, отчетливо демонстрирует наличие годовой периодичности, а также периодичностей с периодами менее года. Это хорошо видно из рисунка 3.25, на котором представлена развертка огибающей спектральной составляющей геомагнитных вариаций с периодом 1 сут для одного из временных отрезков длительностью 60 сут (на графике отчетливо выделяются периодичности, кратные ~14 сут). Более сложная картина наблюдается для спектральных составляющих с периодами 14 (рисунок 3.24б) и 27 сут (рисунок 3.24в). Так, наряду с годовой периодичностью на спектральной составляющей 14 сут выделяются периодичности около 8 и 60 сут (рисунок 3.24б). 27-суточная спектральная составляющая характеризуется периодичностями 14 и около 60 сут (рисунок 3.24в).

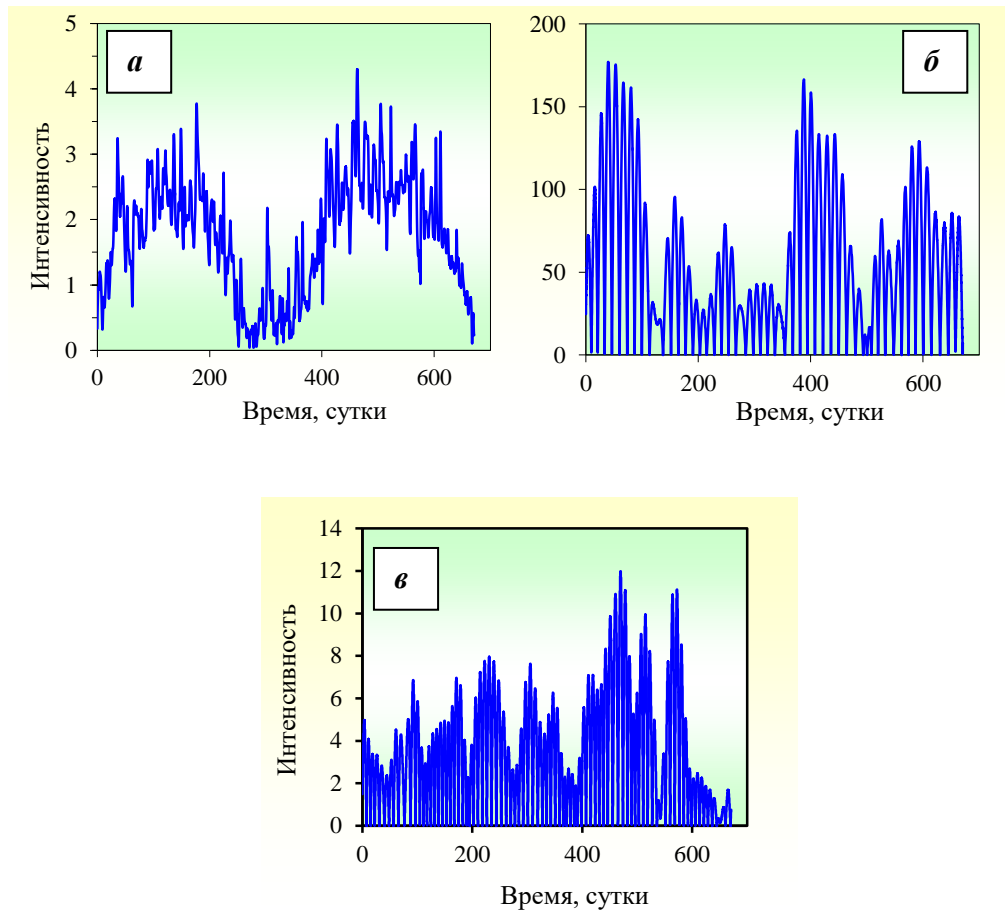


Рисунок 3.24 – Вариации спектральных составляющих геомагнитных вариаций на обсерватории "Михнево" с периодами 1 (*a*), 27 (*б*) и 14 (*в*) сут

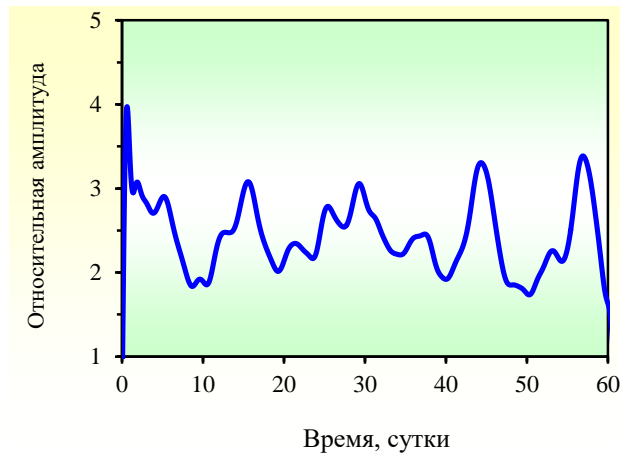


Рисунок 3.25 – Огибающая спектральной составляющей геомагнитных вариаций с периодом 1 сут. на обсерватории "Михнево"

3.2. Суточные вариации магнитного поля Земли

Регулярная суточная вариация. Исследование регулярной суточной вариации показало, что суточный ход геомагнитных вариаций в магнитоспокойные дни не меняется на протяжении анализируемого десятилетнего периода (с 2008 г. по 2017 г.). Это подтверждается результатами наложения суточных вариаций за весь период наблюдений (рисунок 3.26). Изменение значений геомагнитного поля в течение суток обусловлено изменением величины и конфигурации электрических токов в динамо-области ионосферы Земли (на высоте около 90 – 150 км над поверхностью Земли) [372, 587, 612, 638, 642]. В периоды геомагнитных возмущений в искажения суточного хода (обусловленного Sq токовой системой при воздействии ветров нейтральной атмосферы на заряженные частицы ионосферы) вносят вклад другие источники, например, перестройка и образование новых магнитосферных токовых систем.

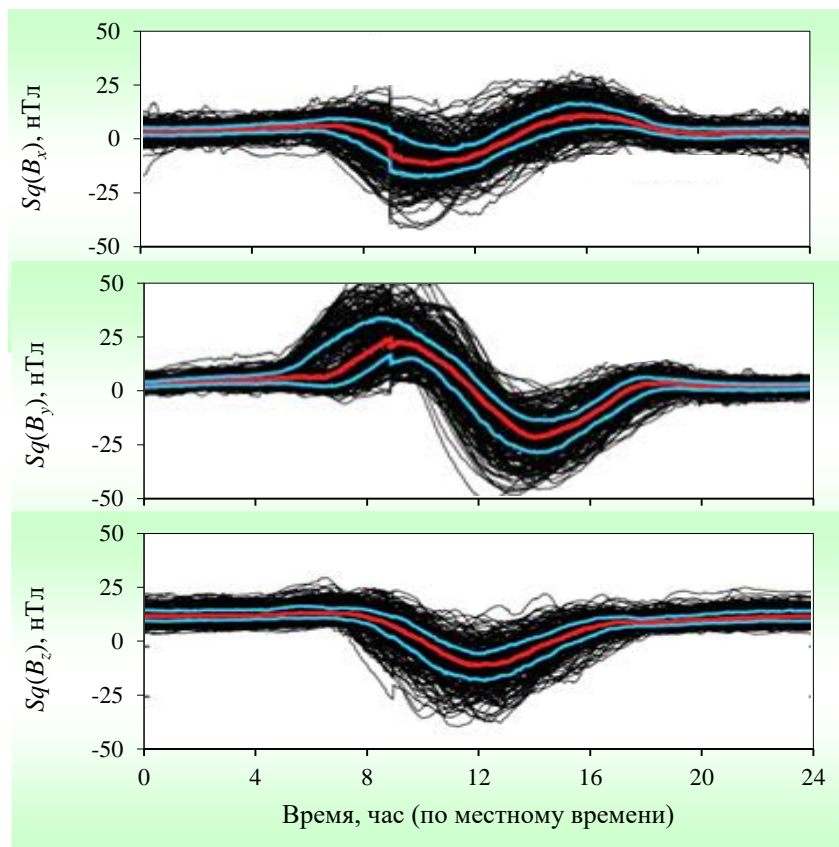


Рисунок 3.26 – Суточный ход геомагнитных вариаций в магнитоспокойные дни на обсерватории "Михнево" Красная линия – медиана, синяя нижняя линия – 1-й квартиль, а верхняя синяя линия – 3-й квартиль.

Анализ вычисленной медианы суточных вариаций показал, что, в среднем, суточный ход северной горизонтальной компоненты B_x характеризуется утренним

минимумом (примерно в 10:00 по местному (московскому) времени) и дневным максимумом (в 15:30). Период малых изменений (спокойный интервал) начинается около 18:40 и заканчивается около 7:00. Сопоставление суточного хода B_x -компоненты геомагнитного поля с положением Солнца продемонстрировало, что минимум суточной вариации наблюдается примерно за 2 часа до кульминации Солнца, а максимум – примерно на 3 часа позже кульминации Солнца. Время начала спокойного интервала, 19:00, близко к времени заката, а конца, 07:00, близко к времени восхода солнца. Это указывает на то, что спокойный интервал заканчивается в момент восхода солнца, и значение B_x -компоненты геомагнитного поля начинает постепенно уменьшаться. Оно продолжает уменьшаться до минимума за два часа до кульминации Солнца, а затем постепенно увеличивается и через три-четыре часа после полудня достигает максимума. После полудня величина B_x -компоненты постепенно уменьшается, с заходом Солнца начинается спокойный интервал, в котором величина геомагнитного поля почти не меняется, этот интервал заканчивается с восходом Солнца.

В отличие от суточного хода B_x -компоненты, который показывает широкий диапазон изменений, диапазон изменений вертикальной компоненты B_z значительно меньше. Максимум суточных вариаций для вертикальной компоненты B_z не удалось идентифицировать, минимальное значение достигается примерно около полудня (во время кульминации Солнца). Период спокойного интервала для B_z -компоненты значительно больше (его начало наблюдается намного раньше, в 16:00 и конец позже, в 08:00). В целом, суточный ход этой компоненты соответствует изменению положения Солнца в течение суток. Для восточной горизонтальной компоненты B_y минимум суточных вариаций наблюдается в 14:00, а максимум – в 9:00. Динамика изменения минимума и максимума этой компоненты противоположна изменению максимальных и минимальных значений северной горизонтальной компоненты в течение суток, а время начала (17:00) и конца (06:30) спокойного интервала для горизонтальных компонент совпадают.

В целом, суточный ход вариаций трех компонент соответствует изменению геомагнитного поля в средних широтах [197, 381, 405, 520, 623, 669], где расположена обсерватория "Михнево". Этот суточный ход обусловлен движением Sq -токовой системы над пунктом наблюдений (обсерватория "Михнево") [457, 461, 515, 600, 622, 673]. При восходе Солнца, когда Sq -токовая система входит в регион наблюдений

(обсерватория "Михнево"), направление ее магнитного поля (ток направлен на запад) противоположно направлению B_x компоненты геомагнитного поля, что приводит к снижению значений северной горизонтальной компоненты. Во время прохождения над обсерваторией фокуса этой системы величина B_x -компоненты достигает минимума, а токовая система меняет направление, наблюдается увеличение значений северной горизонтальной компоненты до достижения максимума во время заката, когда Sq -токовой системы уже нет над пунктом наблюдений. Это значение остается почти постоянным до нового восхода Солнца. Поскольку направление магнитного поля Sq -токовой системы (электрический ток ионосферы имеет южное направление) совпадает с направлением B_y -компоненты геомагнитного поля, для этой компоненты характерен рост и максимум в утреннее время, во второй половине дня (северное направление) идет снижение величины B_y -компоненты. Т.е. суточный ход восточной горизонтальной компоненты характеризуется противоположным поведением.

Сезонное изменение суточной вариации. Анализ сезонных изменений регулярной суточной вариации свидетельствует о том, что амплитуда суточных вариаций на Геофизической обсерватории "Михнево" больше в летний период и меньше в зимний период (рисунок 3.27). Увеличение амплитуды вариаций геомагнитного поля на протяжении суток в летний период и уменьшение в зимний период, в целом, характерно для среднеширотных районов [272, 381, 520, 623, 669, 671]. Результаты определения времени характерных точек (минимум, максимум, начала и конца спокойного интервала) суточного хода на обсерватории "Михнево" для трех компонент геомагнитного поля в разные сезоны приведены в таблице 3.3. Анализ показал, что самый ранний минимум суточной вариации северной компоненты наблюдается в летний период (с июня по август) примерно в 9:50, а самый поздний – в зимний период (с декабря по февраль) в 11:25. Определение максимума суточной вариации северной горизонтальной компоненты затруднено, поскольку значения не сильно меняются по величине вплоть до 15:00. Такое поведение обусловлено тем, что Sq -токовая система имеет наибольшую вариацию летом и не сильно меняется зимой. Анализ показал, что начало спокойного интервала северной горизонтальной компоненты наблюдается около 18:30 для всех четырех сезонов, а конец – в 06:20 летом (самый ранний) и в 08:50 зимой (самый поздний). Начало спокойного интервала для восточной горизонтальной компоненты наблюдается в 17:00 осенью и зимой (самое раннее) и в 18:40 летом (самое

позднее). Аналогично восточной горизонтальной компоненте ведет себя вертикальная компонента. Время начала (16:40) и конца спокойного интервала (8:10) почти одинаково для осени и зимы. В летний период эти значения немного смещены по времени: начало в 18:30, конец примерно в 06:40. Продолжительность спокойного интервала для всех трех компонент меньше летом и больше зимой. Изменения положения максимума и минимума для сезонных и месячных вариаций геомагнитного поля обусловлены изменениями в Sq -токовой системе ионосферы Земли. Поскольку положение максимума и минимума для Sq -токовой системы изменяется сезонно, компоненты геомагнитного поля также проявляют аналогичную тенденцию [515, 589, 622].

Таблица 3.3. Сезонные вариации четырех точек (минимум, максимум, начало и конец спокойного интервала) трех компонент геомагнитного поля (с 2008 г. по 2017 г.).

	Минимум			Максимум			Начало спокойного периода			Конец спокойного периода		
	B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z
Лето	9,8	13,7	10,8	15,6	8,4	6,1	18,6	18,7	18,5	6,3	5,2	6,6
Весна	10,6	14,2	11,9	15,5	9	7,4	18,5	17,9	16,6	7,2	6,8	8,2
Осень	10,7	13,8	12,4	15,8	9,1	7,6	18,5	17,1	16,7	7,8	7,7	8,2
Зима	11,4	14,0	12,2	15,8	10,2	7,7	18,0	16,9	15,4	8,8	7,6	8,3

Анализ суточного хода геомагнитного поля на Геофизической обсерватории "Бельск" показал, что поведение суточных изменений компонент магнитного поля аналогично отмеченному на обсерватории "Михнево", но с небольшим расхождением по времени. Амплитуда суточных вариаций достигает максимальных значений в летний период и минимума в зимний период. Самый продолжительный спокойный интервал характерен для зимнего периода, а самый короткий – для летнего. Изложенные выше результаты позволяют прийти к заключению, что выявленные особенности регулярных суточных вариаций характерны для условий средних широт и обусловлены передвижением Sq -токовой системы и ее сезонными изменениями.

Особенности периодичностей суточной вариации. Спектры мощностей (рисунок 3.28) и результаты вейвлет-анализа (амплитуда) (рисунок 3.29) среднечасовых значений компонент геомагнитного поля на Геофизической обсерватории "Михнево" демонстрируют наличие вариаций с периодами, равными 6, 8, 12 и 24 часам. Те же периодичности демонстрируют среднечасовые значения компонент геомагнитного поля

на среднеширотной обсерватории "Бельск". В качестве примера на рисунках 3.30 и 3.31 приведены соответственно спектры мощностей и амплитуда вейвлет-преобразования среднечасовых значений компонент геомагнитного поля на обсерватории "Бельск". Картины амплитуды вейвлет-преобразования трех компонент геомагнитного поля на обеих обсерваториях (рисунки 3.29 и 3.31) демонстрируют повторяющиеся однотипные вариации в суточном диапазоне. Это свидетельствует о монофрактальности суточных вариаций, подтверждение этой особенности приводится в разделе 3.1. Нарушение повторяемости суточных вариаций на картине вейвлет-преобразования обусловлено образованием нерегулярных возмущений геомагнитного поля Земли, что подтверждается результатами известных работ [93, 299, 436].

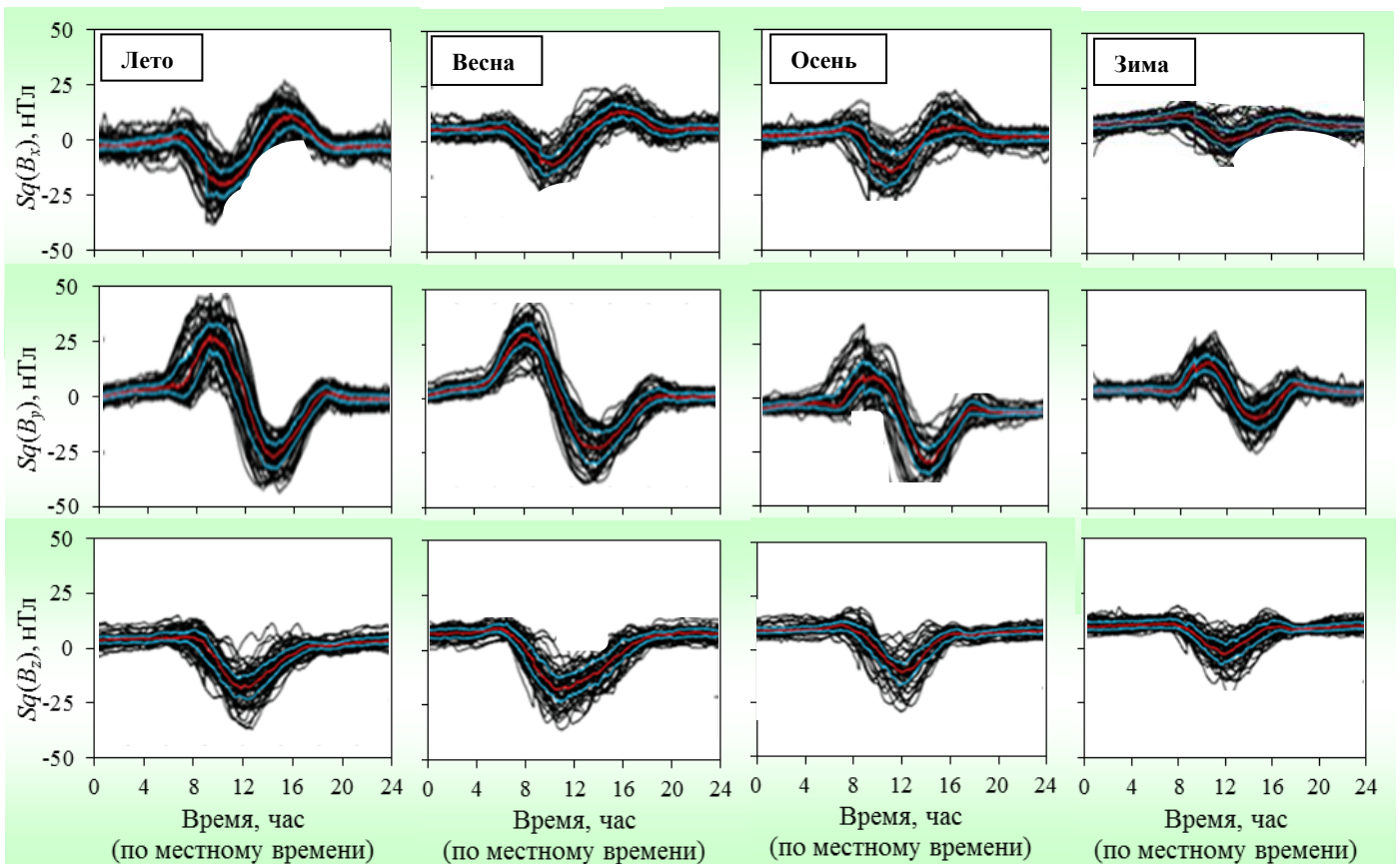


Рисунок 3.27 – Сезонные вариации суточного хода геомагнитных вариаций в магнитоспокойные дни на обсерватории "Михнево" Красная линия – медиана, синяя нижняя линия – 1-й квартиль, а верхняя синяя линия – 3-й квартиль.

Учитывая, что формирование суточной вариации обусловлено солнечно-лунным приливом (действие сил притяжения Луны и Солнца и термогравитационные солнечные приливы) в полусуточном и суточном диапазонах [175, 237, 199, 334, 378, 433, 452, 588, 613, 665, 673], можно ожидать наличие спектральных гармоник, совпадающих с

периодами приливных волн (таблица 2.6). Результаты спектрального анализа вариаций модуля магнитного поля Земли представлены на рисунках 3.32 и 3.33 в виде периодограмм для двух участков околосуточных и полусуточных периодов, соответственно. Данные рисунков 3.32 и 3.33 свидетельствуют о наличии хорошо выраженных периодичностей в геомагнитных вариациях с периодами основных приливных волн, которые помечены в поле рисунков в соответствии с принятыми обозначениями.

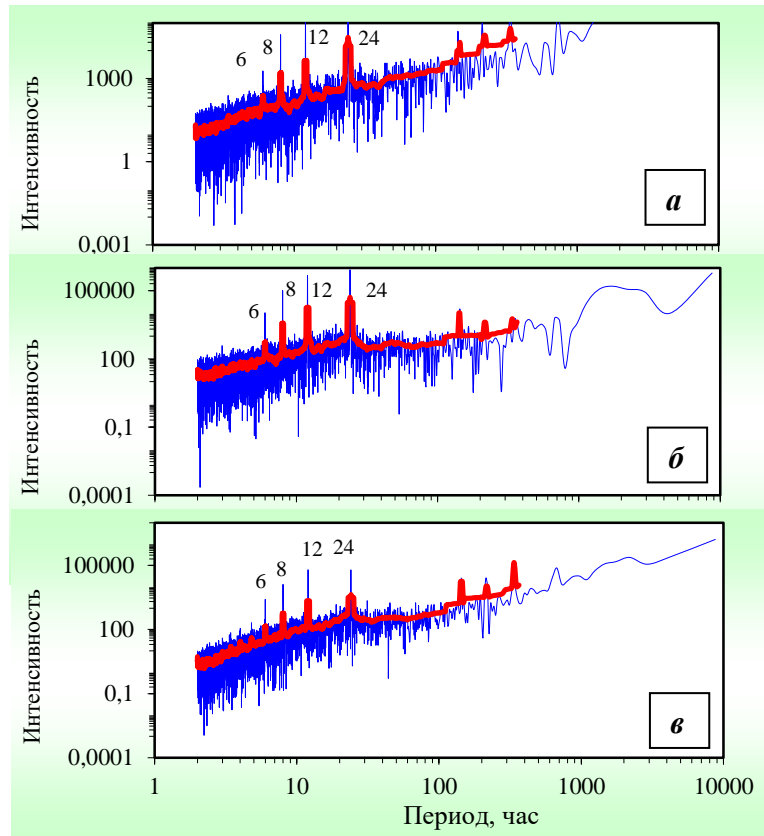


Рисунок 3.28 – Периодограммы (синие линии) и глобальные вейвлет-спектры (красные линии) среднечасовых значений геомагнитных вариаций ($a - B_x$, $b - B_y$, $c - B_z$) на обсерватории "Михнево" с 01.01.2014 г. по 31.01.2014 г.

Однако, часть гармоник нельзя было идентифицировать с приливным воздействием со стороны системы Луна и Солнце. Принимая во внимание результаты работ [220, 297], можно объяснить эти дополнительные гармоники амплитудной модуляцией более длинными периодами. Наличие гармоник 1 и 4 , отстоящих от гармоники S_1 на $\sim 0,073$ 1/сут, вероятно, обусловлено модуляцией гармоники S_1 периодом 13,66 сут. В результате модуляции S_1 27-суточной периодичностью имеются спектральные пики с частотами $\sim 0,9922$ 1/сут (пик 2) и $\sim 1,0082$ 1/сут (пик 3 на рисунке 3.32). Тройка спектральных гармоник S_1 , 7 и 8 (рисунок 3.29) демонстрирует модуляцию

волны S_1 11-летним циклом, а другая тройка S_1 , 6 и 9 демонстрирует модуляцию S_1 годовым периодом. Суперпозиция пиков S_1 , 5 и 10 характеризует модуляцию амплитуды суточных колебаний S_1 полугодовым периодом. Анализ данных рисунка 3.33 демонстрирует, что пики 1 и 4 вызваны модуляцией гармоники S_2 периодом 13,66 сут, а пики 2 и 3 модуляцией гармоники S_2 периодом 27 сут. Тройка гармоник S_2 , 7 и 8 (рисунок 3.33) объясняется модуляцией S_2 11-летним циклом, а другая тройка S_2 , 6 и 9 модуляцией S_2 годовым периодом. В результате модуляции полугодовым периодом имеются спектральные пики с частотами $\sim 0,4945$ 1/сут (пик 5) и $\sim 0,505$ 1/сут (пик 10).

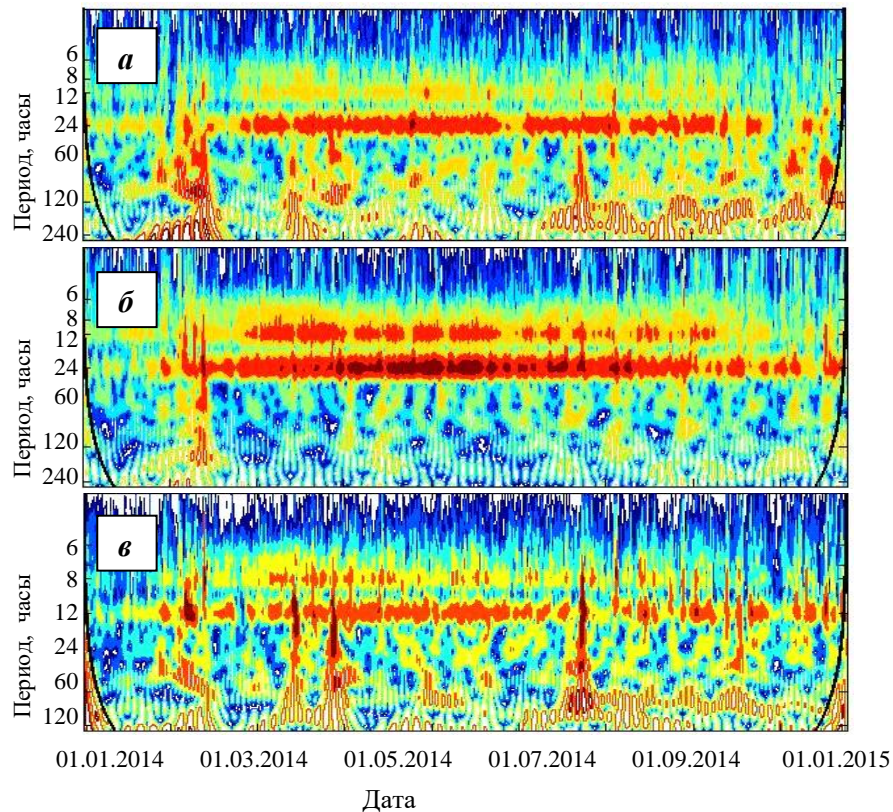


Рисунок 3.29 – Результаты вейвлет-анализа среднечасовых значений геомагнитных вариаций (a – B_x , b – B_y , c – B_z) на обсерватории "Михнево" с 01.01.2014 г. по 31.01.2014 г.

Аналогичные результаты в околосуточных и полусуточных периодах были получены при анализе данных инструментальных наблюдений за вариаций магнитного поля Земли на Геофизической обсерватории "Бельск". Анализ спектров на рисунках 3.34 и 3.35, показал, что в спектрах присутствуют гармоники, как соответствующие гармоникам лунно-солнечного воздействия, так и гармоники, обусловленные модуляцией 11-летним циклом, периодами год, полгода, 27 суток и примерно две недели.

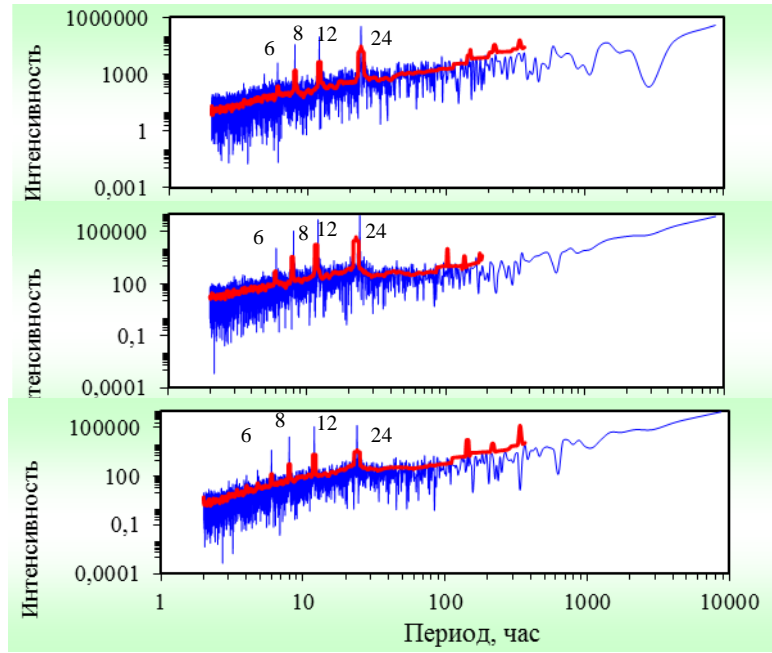


Рисунок 3.30 – Периодограммы (синие линии) и глобальные вейвлет-спектры (красные линии) среднечасовых значений геомагнитных вариаций ($a - V_x$, $b - V_y$, $c - V_z$) на обсерватории "Бельск" с 01.01.2014 г. по 31.01.2014 г.

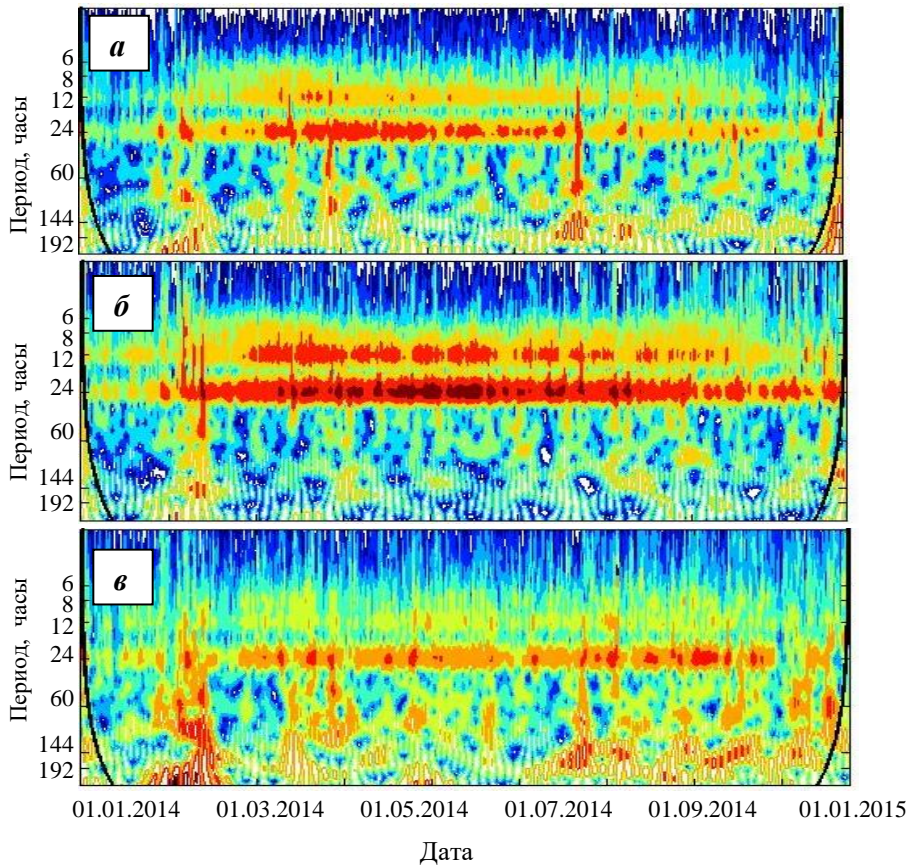


Рисунок 3.31 – Результаты вейвлет-анализа среднечасовых значений геомагнитных вариаций ($a - V_x$, $b - V_y$, $c - V_z$) на обсерватории "Бельск" с 01.01.2014 г. по 31.01.2014 г.

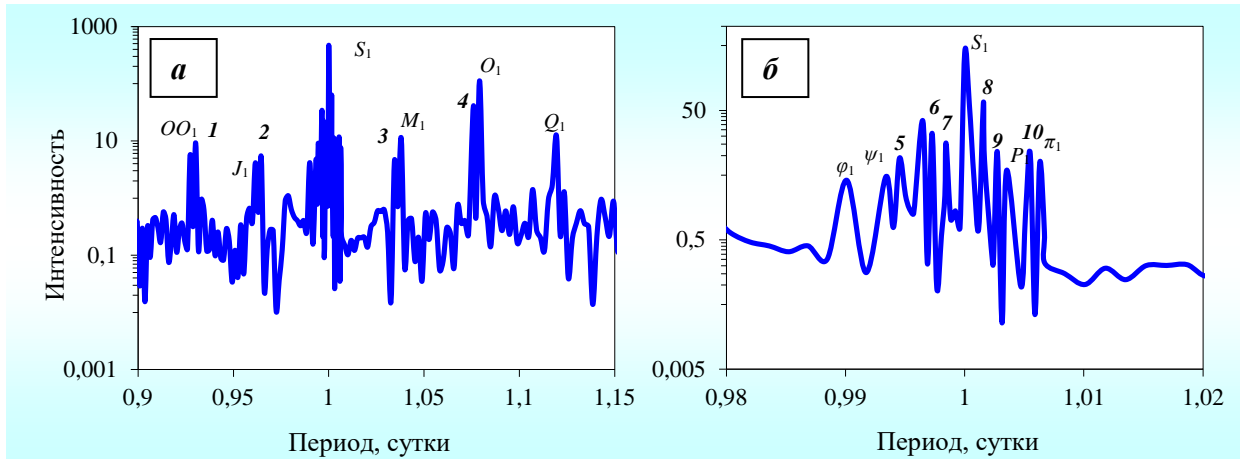


Рисунок 3.32 – Периодограммы геомагнитных вариаций в околосуточной области: 0,9 – 1,15 сут (*a*), 0,98 – 1,02 сут (*б*) на обсерватории "Михнево"

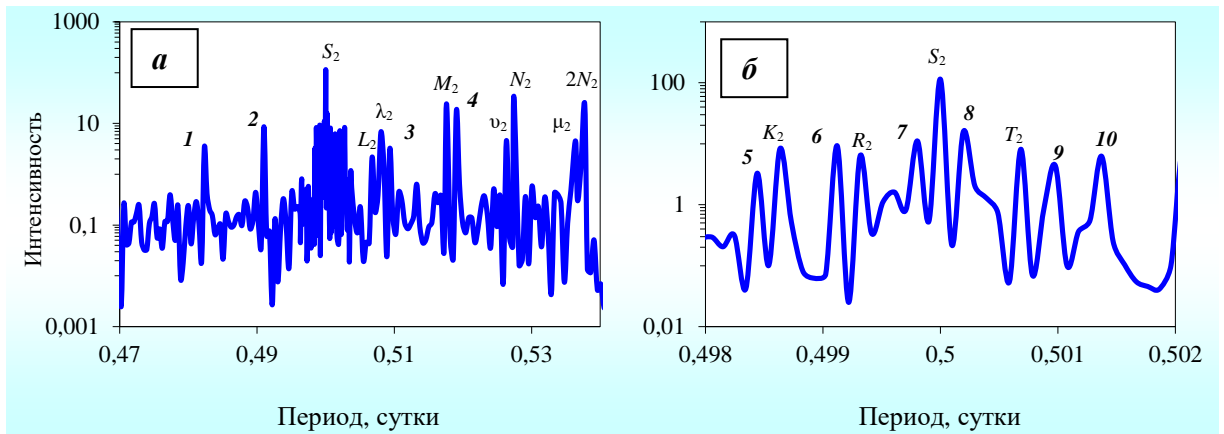


Рисунок 3.33 – Периодограммы геомагнитных вариаций в полусуточной области: 0,47 – 0,54 сут (*a*), 0,498 – 0,502 сут (*б*) на обсерватории "Михнево"

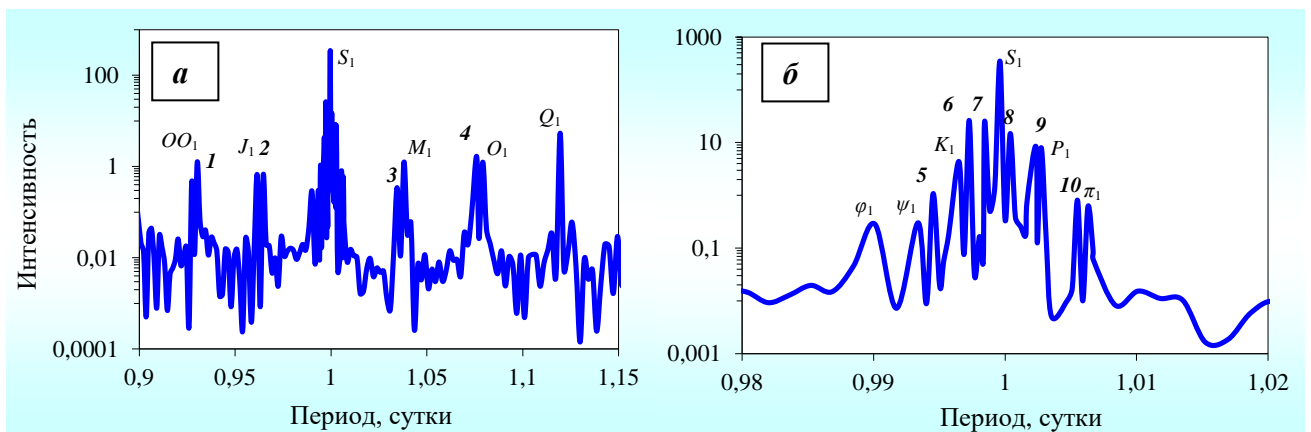


Рисунок 3.34 – Периодограммы геомагнитных вариаций в околосуточной области: 0,9 – 1,15 сут (*a*), 0,98 – 1,02 сут (*б*) на обсерватории "Бельск"

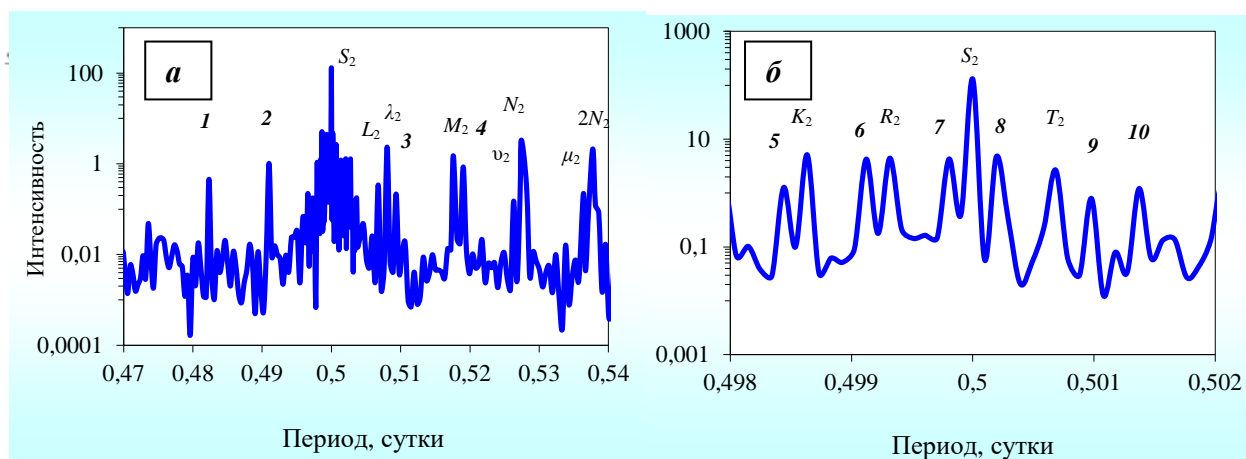


Рисунок 3.35 – Периодограммы геомагнитных вариаций в полусуточной области: 0,47 – 0,54 сут (а), 0,498 – 0,502 сут (б) на обсерватории "Бельск"

Таким образом, можно констатировать, что геомагнитные вариации в околосуточном и полусуточном диапазонах на средних широтах формируются не только под влиянием лунно-солнечного прилива, но и вследствие модуляций волны солнечного происхождения S_1 и S_2 годовым, полугодовым периодами, периодами 13,66 и 27,5 сут., а также 11-летним циклом.

3.3. Особенности геомагнитной активности

Результаты анализа геомагнитной активности. В настоящей работе проводился сравнительный анализ планетарного K_p и станционного (Геофизическая обсерватория "Михнево") K индексов геомагнитной активности за период 2009 – 2017 гг. Временные вариации рассчитанных трехинтервальных планетарного K_p и станционного K индексов приведены на рисунке 3.36. Данные свидетельствуют о том, что в значительном количестве случаев (~ 41% от общего числа) максимальные за сутки значения K_p и K отличаются на одну единицу в ту или иную сторону (в 139 случаях это отличие составляет две единицы в меньшую для K -индекса сторону, в 57 случаях – в большую, отличие составляет три единицы в меньшую для K -индекса сторону в 43 случаях, четыре единицы – в 16 случаях, пять единиц – в 3 случаях, шесть единиц – в 2 случаях, отличие составляет три единицы в большую для K -индекса сторону в 15 случаях, четыре единицы – в 6 случаях). При исследовании локальной геомагнитной активности с учетом квазилогарифмической нелинейности шкалы вычисления K -индекса такое отличие в геомагнитной активности следует считать значительным.

Количественная характеристика геомагнитных возмущений разной интенсивности на обсерватории "Михнево" за период 2009 – 2017 гг. представлена в таблице 3.4. С учетом общего количества 3-х часовых интервалов за указанный период наблюдений (26296 интервалов) получаем, что более чем в 44 % случаях на обсерватории "Михнево" наблюдалось в разной степени возмущенное состояние магнитного поля. Статистика наиболее сильных геомагнитных возмущений ($K \geq 4$) по количеству дней в году приведена в таблице 3.5 (анализировалась выборка максимальных за сутки значений $K = K_0$) и в виде гистограммы на рисунке 3.37.

Полученные данные свидетельствуют о высоком уровне геомагнитной активности на обсерватории "Михнево": за 3287 дней наблюдений магнитные бури ($K > 4$) наблюдались в 736 сутках (при этом зарегистрировано шесть больших бурь с $K \geq 7$), возмущенная геомагнитная обстановка – в 967 сутках.

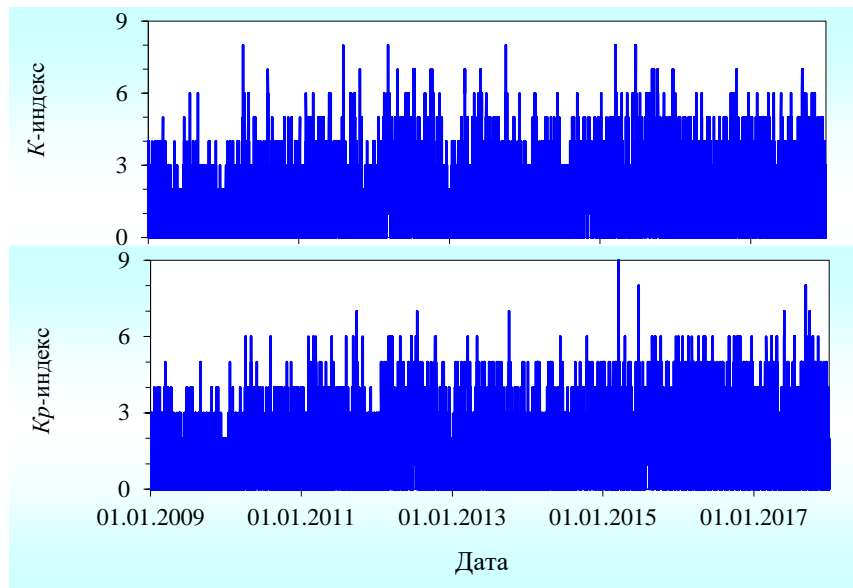


Рисунок 3.36 – Временные вариации рассчитанных трехинтервальных планетарного K_p и стационарного (обсерватория "Михнево") K индексов

С целью выделения периодичностей в вариациях геомагнитных возмущений анализировался ряд суточных значений (в качестве величины K_C выбиралась сумма трехчасовых значений геомагнитного K -индекса за сутки). Результаты представлены на рисунке 3.38, из которого следует, что вариации K_C характеризуются четко выраженными периодичностями с характерными периодами около 14, 27, 60, 182 и 365 сут. Эти периодичности согласуются с выявленными в разделе 3.1 периодичностями геомагнитного поля, характерными для условий средних широт.

Таблица 3.4. Частота геомагнитных возмущений разной интенсивности по 3-х часовым интервалам для обсерватории "Михнево" за период 2009 – 2017 гг. Значения не были определены на 197 интервалах.

Характеристика геомагнитного возмущения	Большая магнитная буря	Магнитная буря		Возмущенное состояние магнитного поля	Слабовозмущенное состояние магнитного поля		Спокойное состояние
	$K \geq 7$	$K = 6$	$K = 5$	$K = 4$	$K = 3$	$K = 2$	$K < 2$
Количество событий	12	70	384	1190	3405	6594	14444
%	0,046	0,27	1,47	4,56	13,05	25,26	55,34

Таблица 3.5. Количество дней, характеризующихся геомагнитными возмущениями с $K = K_0$, для обсерватории "Михнево" по годам

K_0	Год								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
9	-	-	-	-	-	-	1	-	-
-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
-	-	-	1	1	1	-	-	-	1
6	-	3	7	9	2	2	10	6	8
5	2	6	14	30	20	22	49	40	33
4	15	38	45	51	51	56	77	74	60

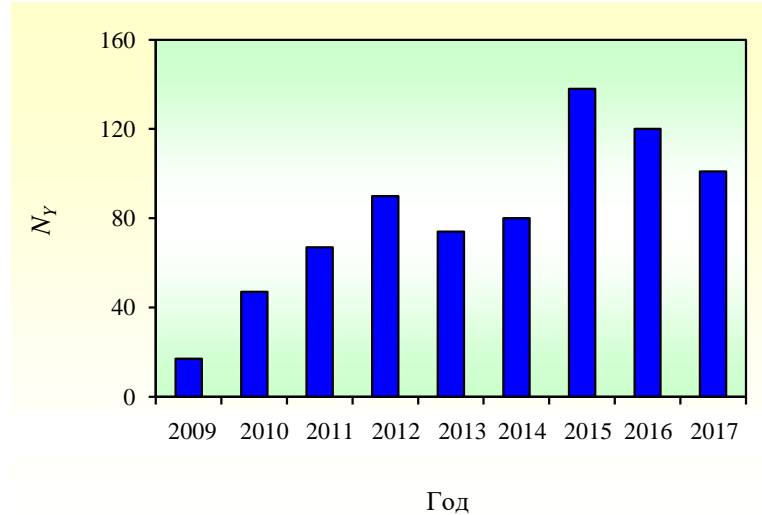


Рисунок 3.37 – Гистограмма количества дней в году N_y , характеризующихся возмущенным состоянием геомагнитной обстановки на обсерватории "Михнево" с $K \geq 4$

Графики месячной повторяемости геомагнитных возмущений с $K > 3$ (слабые возмущения), $K > 4$ (сильные возмущения) для условий обсерватории "Михнево" приведены на рисунке 3.39. В целом, по графикам идентифицировать периодические вариации повторяемости геомагнитных возмущений не удастся. Вычисление спектров

мощности (рисунок 3.40) позволило выявить примерно 60-суточные, годовые и полугодовые периодичности повторяемости возмущенных геомагнитных вариаций и сильных геомагнитных возмущений.

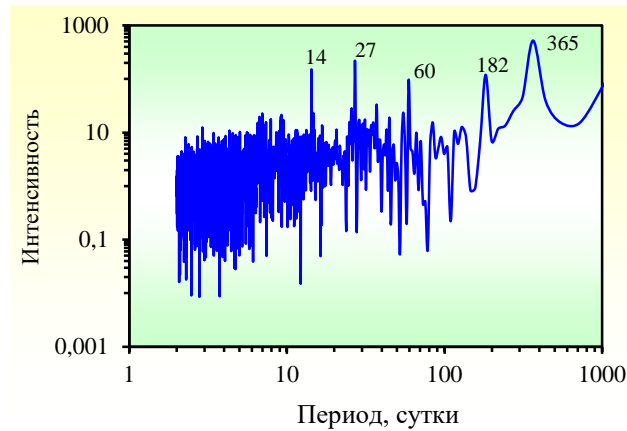


Рисунок 3.38 – Периодограмма суммарных значений повторяемости геомагнитных возмущений с максимальным за сутки индексом K за период 2009 – 2017 гг. на ГФО "Михнево"

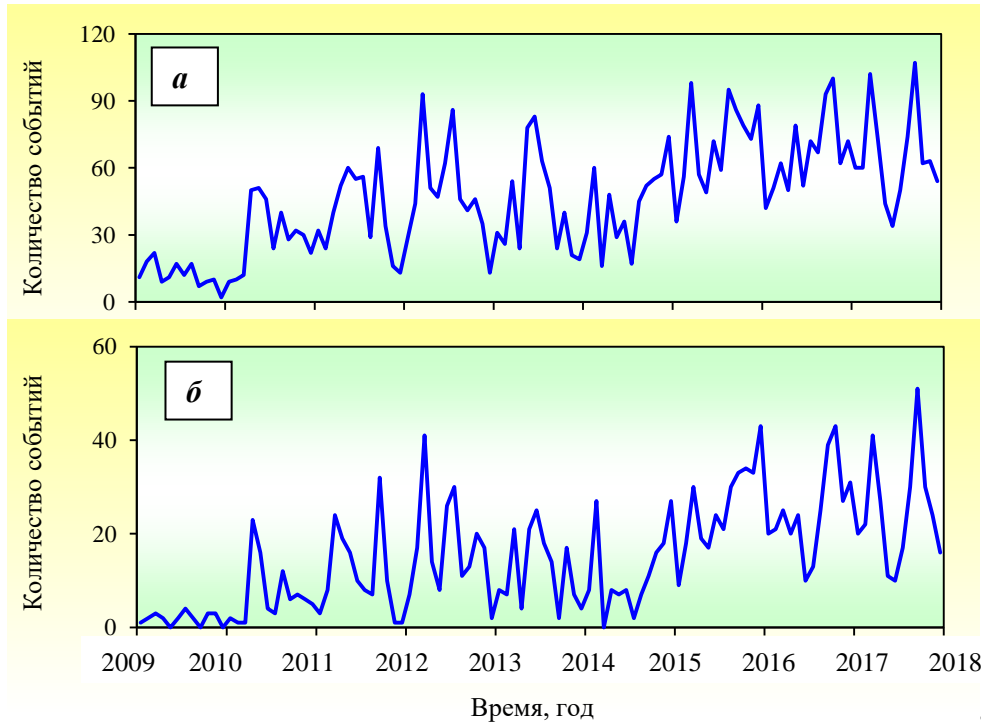


Рисунок 3.39 – Повторяемость геомагнитных возмущений с индексом $K \geq 3$ (возмущенная геомагнитная обстановка) (a) и $K \geq 4$ (сильные возмущения) (б) за период 2009 – 2017 гг. на обсерватории "Михнево"

Подробнее в настоящей работе исследуется сезонное изменение геомагнитной активности. Графики повторяемости геомагнитных возмущений в зависимости от месяца, приведенные на рисунке 3.41, демонстрируют, что для локальной геомагнитной активности на обсерватории "Михнево" характерно увеличение числа возмущений в периоды равноденствий, причем доминирует весенний максимум. Небольшой максимум

фиксируется в летний период, и наблюдается существенное снижение активности в зимний период времени. Об увеличении геомагнитной активности в периоды равноденствий свидетельствуют результаты анализа суточной суммы трехчасовых значений. При этом исследуются минимальное, максимальное и среднее за неделю и месяц значения этих сумм. Результаты анализа приведены на рисунке 3.42. Видно, что с повышением уровня возмущений начинает доминировать полугодовая периодичность. При низком уровне геомагнитной активности ярче проявляется годовая периодичность. Для средней геомагнитной активности характерны как годовая, так и полугодовая периодичности, причем максимум первой периодичности наблюдается близко к летнему солнцестоянию, а второй в периоды равноденствий.

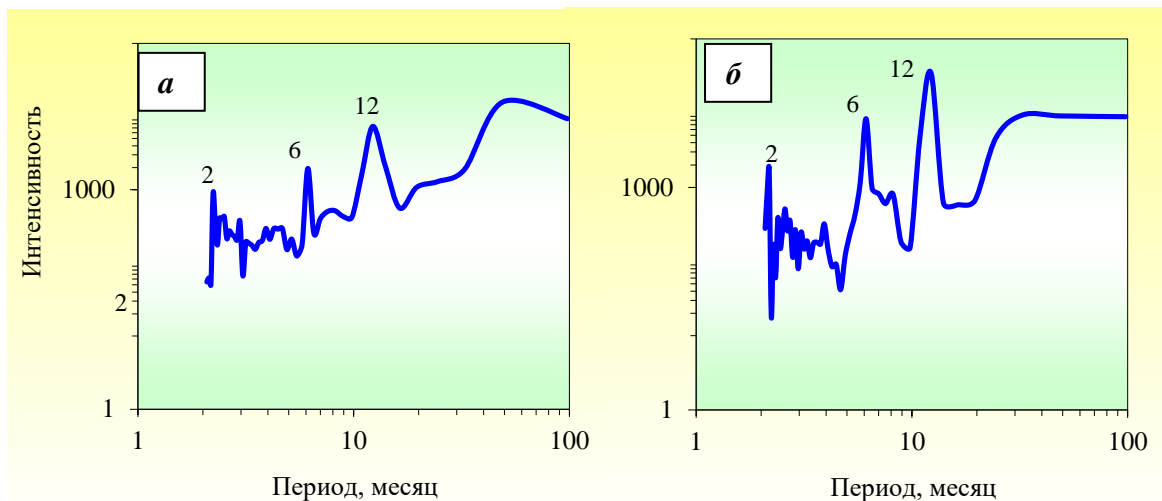


Рисунок 3.40 – Периодограмма повторяемости геомагнитных возмущений с индексом $K \geq 4$ (сильные возмущения) (а) и $K \geq 3$ (возмущенная геомагнитная обстановка) (б) за период 2009 – 2017 гг. на обсерватории "Михнево"

Наряду с количеством событий важным параметром геомагнитной активности является общая продолжительность геомагнитных возмущений разной интенсивности T . Изменение со временем продолжительности геомагнитных возмущений (рисунок 3.43) аналогично вариации частоты геомагнитных возмущений. При этом отчетливо проявляется периодичность с периодом 6 мес. Вычисление средней за 2009 – 2017 гг. суммарной помесечной продолжительности геомагнитных возмущений T_1 , характеризующихся индексом $K \geq 4$, (рисунок 3.44) показывает, что величина T_1 минимальна примерно во время зимнего солнцестояния, достигает значительных максимумов примерно в периоды равноденствия, при этом доминирует весенний максимум, и наблюдается незначительное увеличение в период летнего

солнцестояния. Динамика продолжительности сильных геомагнитных возмущений T_2 ($K = 5$ и 6) аналогична.

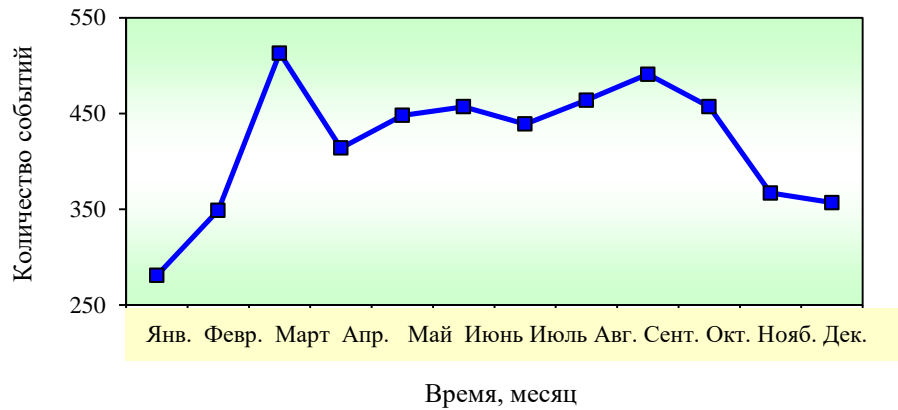


Рисунок 3.41 – Средняя за период 2009 – 2017 гг. повторяемость трехчасовых промежутков геомагнитных возмущений в зависимости от месяца на обсерватории "Михнево"

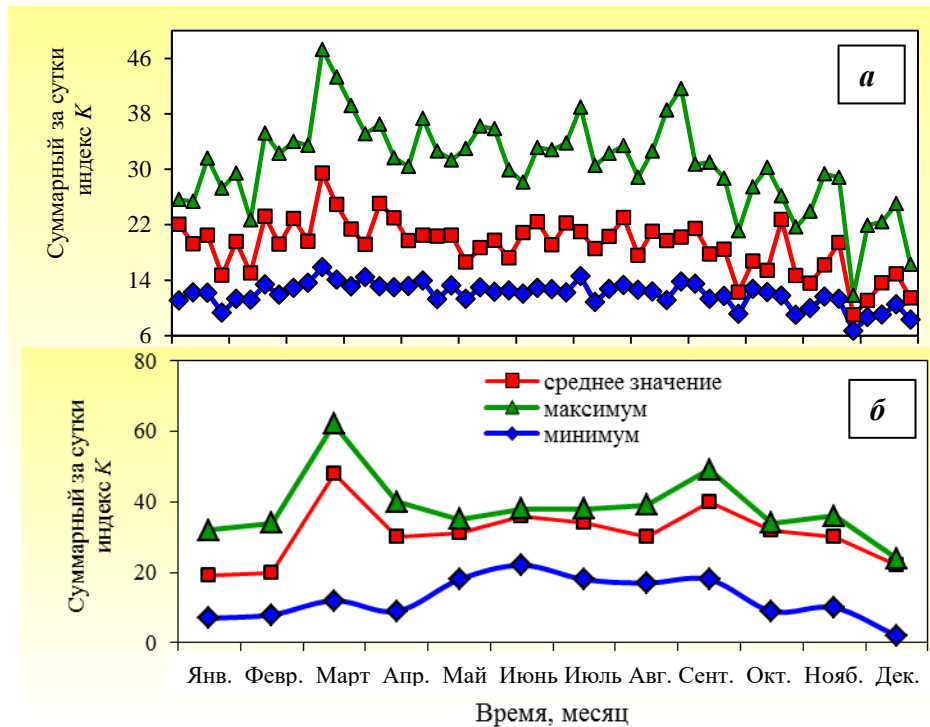


Рисунок 3.42 – Средняя за неделю (а) и месяц (б) сумма трехчасовых индексов K в зависимости от месяца на обсерватории "Михнево" (период 2009 – 2017 гг.)

Итак, анализ рассматриваемых в настоящей работе параметров геомагнитной активности (частота геомагнитных возмущений, суммарный за сутки индекс K , продолжительность геомагнитных возмущений) показал, что для геомагнитной активности на Геофизической обсерватории характерны 27- и 60-суточные периодичности, а также полугодовая и годовая периодичности. В целом, максимумы

геомагнитной активности наблюдаются в периоды равноденствий, причем доминирует весенний максимум, небольшое увеличение геомагнитной активности наблюдается во время летнего солнцестояния.

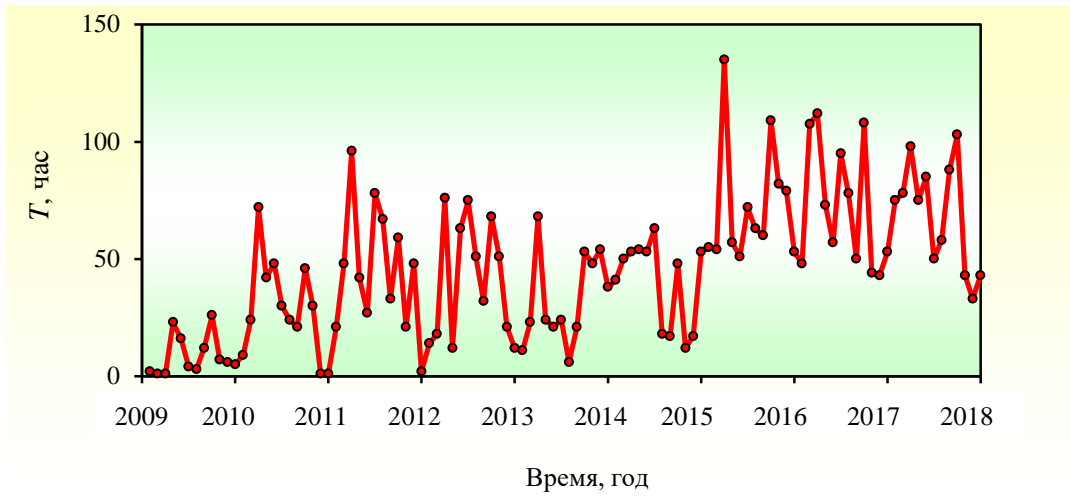


Рисунок 3.43 – Суммарная длительность активного периода геомагнитных возмущений с $K \geq 4$ на обсерватории "Михнево" (период 2009 – 2017 гг.)

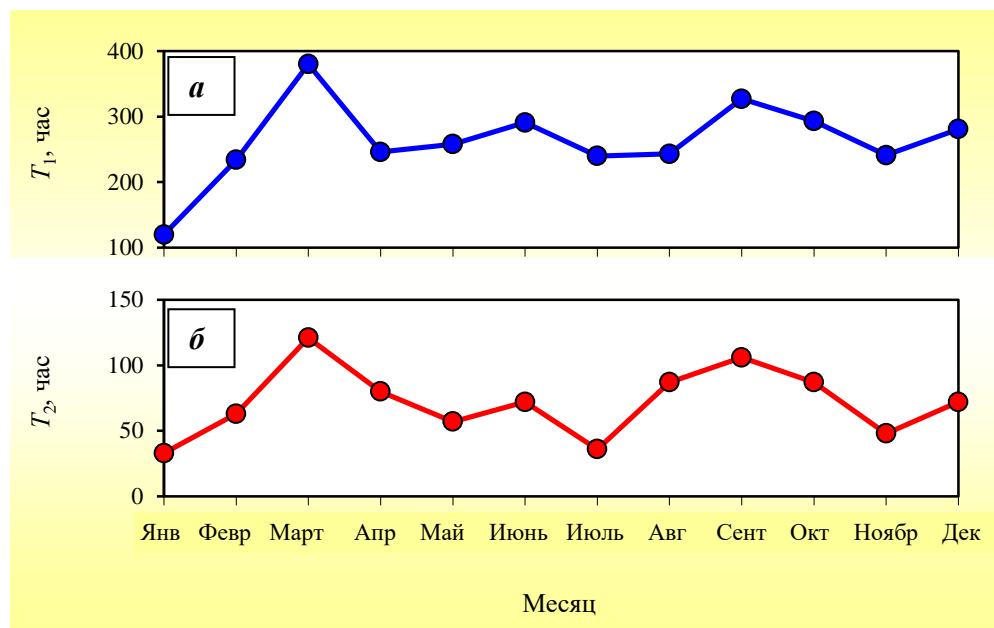


Рисунок 3.44 – Продолжительность по месяцам геомагнитных возмущений с $K \geq 4$ (а) и магнитных бурь с $K = 5$ и 6 (б) на обсерватории "Михнево" за период 2009 – 2017 гг.

Установленные в настоящей работе особенности геомагнитной активности полностью согласуются с ранее выявленными годовой и полугодовой периодичностями с проявлением максимумов в марте и сентябре (вблизи равноденствий) и минимумов в июне и декабре (около солнцестояний) [108, 132, 442 464, 470, 478, 527]. Кроме того,

результаты настоящих исследований подтвердили асимметрию равноденствующих максимумов [323, 480, 628].

Связь между геомагнитной и солнечной активностью. При исследовании корреляционных зависимостей и временной задержки между изменениями солнечной и геомагнитной активности в качестве меры солнечной активности, в настоящей работе используются индекс $F10.7$ – параметр, определяющий интенсивность (плотность потока) радиоизлучения Солнца на частоте 10,7 см (2800 МГц) и число Вольфа (Международное число солнечных пятен) (рисунок 3.45).

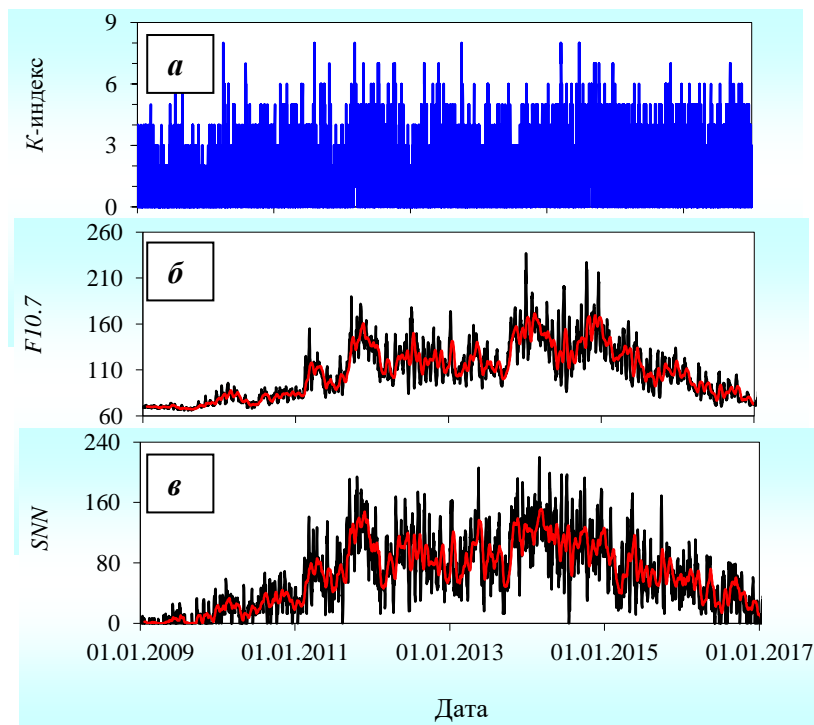


Рисунок 3.45 – Временные вариации геомагнитного K на обсерватории "Михнево" (а), индекса солнечной активности $F10.7$ (б), числа Вольфа (в)

Текущий 24-ый цикл солнечной активности, начавшийся в январе 2009 г., характеризуется низкой степенью активности ("глубокий минимум") [395, 463, 656]. Максимум солнечной активности этого цикла наблюдался в апреле 2014 года и составил 116,4. Он является самым низким максимумом с момента максимума 14-ого цикла [353, 603]. В цикле числа солнечных пятен можно выделить два пика: 98,3 в марте 2012 года и 116,4 в апреле 2014 года. Аналогичные пики проявляются и в другом параметре, характеризующем солнечную активность, в индексе $F10.7$.

Результаты сопоставления временных вариаций параметров солнечной активности (индекс $F10.7$, число солнечных пятен) и среднемесячной суммы K -индекса

(рисунок 3.46) показывают, что максимум геомагнитного K -индекса наблюдается примерно на год позже пика солнечной активности. С целью оценки степени взаимосвязи между солнечными и геомагнитными параметрами в настоящей работе к ежемесячным наборам данных применяется анализ взаимной корреляции. Коэффициенты корреляции, временные задержки приведены в таблице 3.7. Анализ коэффициентов взаимной корреляции и кросс-коррелограмм (пример представлен на рисунке 3.43), свидетельствует о примерно годовом отставании геомагнитной активности относительно солнечной активности в 24-ом цикле солнечных пятен, дополнительным подтверждением этого служат результаты теста Грейнджера на лаге 13 месяцев (таблица 3.8).

Таблица 3.7. Коэффициенты взаимной корреляции и соответствующие временные задержки.

	K	Временная задержка (месяц)
SSN	$0,69 \pm 0,10$	13
$F10.7$	$0,57 \pm 0,09$	12

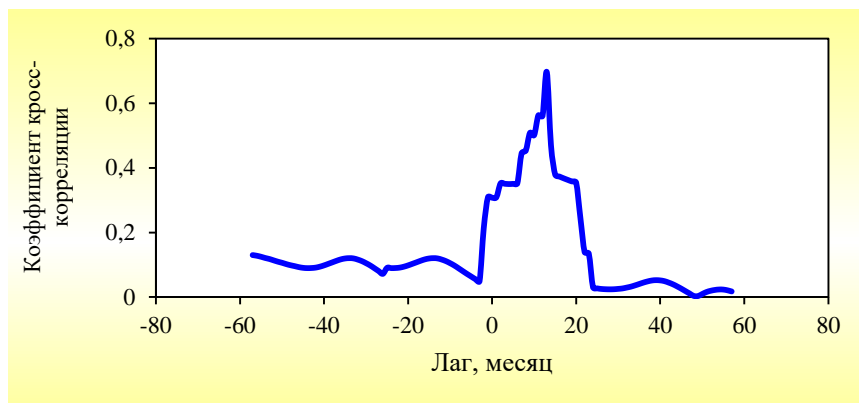


Рисунок 3.46 – Взаимная коррелограмма между индексом K на обсерватории "Михнево" и числом Вольфа

Таблица.3.8. Причинно-следственный анализ связи на основе теста Грейнджера между вариацией индекса $F10.7$ (числа солнечных пятен SSN) и среднемесячной суммы K -индекса

	Лаг равен 13 месяцев (SSN)		Лаг равен 13 месяцев ($F10.7$)	
	F статистика	P значение	F статистика	P значение
K -индекс не является причиной изменения SSN ($F10.7$)	0,433	0,820	0,1665	0,954
SSN ($F10.7$) не является причиной изменения K -индекса	10,5797	$8 \cdot 10^{-6}$	11,5361	$1,6 \cdot 10^{-5}$

Выводы к главе 3:

Анализ результатов регистрации вариаций компонент магнитной индукции на Геофизической обсерватории "Михнево", выполненной за период 2008 – 2017 гг. показал, что трендовая составляющая для горизонтальной компоненты B_x геомагнитного поля плавно уменьшается в течение анализируемого периода и характеризуется слабо выраженными минимумами в периоды равноденствий и максимумами в периоды солнцестояний. Трендовые составляющие вертикальной B_z и горизонтальной B_y компонент геомагнитного поля на протяжении десяти лет имеют практически линейный вид. Разница между рассчитанными по модели *IGRF* и экспериментальными значениями магнитного поля Земли для Геофизических обсерваторий "Бельск", "Борок", "Михнево" и Магнитной обсерватории "Киев", вероятно, связана с аномальной (литосферной) составляющей. По данным регистрации геомагнитных вариаций на обсерваториях "Бельск", "Борок", "Михнево" в настоящей работе были выявлены джерки 2011 г. и 2014 г.

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют о том, что в целом периодические вариации геомагнитного поля в условиях средних широт, а также их отдельные спектральные составляющие сложным образом изменяются со временем и отличаются спорадическим и скейлинговым характером. Обнаружен эффект чередования периодов увеличения и деградации интенсивности геомагнитных вариаций (перемежаемость). В геомагнитном поле выявлен ряд периодичностей: вариации с периодами 6, 8, 12 час, суточные вариации, полугодовые, годовые вариации, вариации с периодами 12 – 14 сут, около 27 и 60 сут, а также в диапазоне 6 – 9 сут. Анализ полученных результатов свидетельствует в пользу предположения о проявлении свойств монофрактальности суточных вариаций геомагнитного поля и о мультфрактальности 27-суточной периодичности и почти двухнедельной гармонике.

На основе анализа суточных изменений магнитного поля на обсерваториях "Михнево" и "Бельск" показано, что изменение величины магнитного поля Земли в течение суток можно связать с передвижением токовой системы над пунктом наблюдений. Установлена сезонная зависимость амплитуды и времени спокойного интервала (значения поля почти не меняются).

В разных частотных диапазонах выявлено, что геомагнитные вариации, скорее всего, формируются и вследствие приливного воздействия со стороны Луны и Солнца, и за счет модуляций большими периодами.

Анализ временных вариаций стационарного K -индекса продемонстрировал, что геофизическая обстановка на Геофизической обсерватории "Михнево" характеризуется значительным количеством дней с возмущенным состоянием геомагнитного поля. Вариации геомагнитной активности на обсерватории характеризуются 27- и 60-суточными периодичностями, а также полугодовой и годовой периодичностями. В целом, максимумы геомагнитной активности наблюдаются в периоды равноденствий, причем доминирует весенний максимум, небольшое увеличение геомагнитной активности наблюдается во время летнего солнцестояния.

Сопоставление геомагнитной (K -индекс) и солнечной активности (индекс $F10.7$ и число солнечных пятен) свидетельствует о значимой корреляции между геомагнитной и солнечной активностью, при этом наблюдается запаздывание (\sim год) между изменением солнечной активности и вызванным изменением суммарного K -индекса, т.е. изменением уровня магнитных возмущений.

Первое защищаемое положение: В вековой вариации геомагнитного поля на Геофизических обсерваториях "Михнево", "Борок" и "Бельск" наблюдаются джерки в 2011 г. и 2014 г. Геомагнитные вариации с периодами от 6 часов до 1 года в условиях средних широт имеют скейлинговый характер. Установлен эффект чередования периодов увеличения и деградации интенсивности геомагнитных вариаций (перемежаемость).

Второе защищаемое положение: Спектральные составляющие геомагнитных вариаций (в диапазонах 13,5 и 27 суток, околосуточном и полусуточном диапазонах) обусловлены совокупностью двух факторов: наличием гармоник, соответствующих лунно-солнечным приливным волнам, и наличием гармоник, вызванных модуляцией большими периодами. В 24-ом цикле солнечной активности для геомагнитной активности в условиях Геофизической обсерватории "Михнево" характерен сдвиг на 1 год относительно солнечной активности, причем, максимум геомагнитной активности наблюдается в период весеннего равноденствия.

ГЛАВА 4. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

4.1. Временные вариации магнитовариационных параметров

В геомагнитных вариациях, зарегистрированных в приповерхностном слое Земли, отражаются изменения со временем параметров твердой среды (в частности, изменение электропроводности земной коры при изменении ее водонасыщенности). При исследовании изменений проводимости земной коры и геоэлектрического профиля по данным регистрации компонент магнитного поля вычисляются магнитовариационные параметры. В этом разделе рассматривается изменение со временем магнитовариационных параметров (магнитный типпер и магнитный тензор) на Геофизической обсерватории "Михнево" в период с 2010 г. по 2013 г.

Вариации магнитного типпера. Анализ показал, что магнитный типпер определяется устойчиво на временном интервале не менее 5 суток (с дискретностью 1 мин), при этом когерентность между вертикальной и горизонтальными компонентами составляет не менее 0,8, в этом случае хорошо выполняется предположение о линейной связи между вертикальным (выходной канал) и горизонтальным полями (входной канал). В качестве примера на рисунке 4.1 представлены временные ряды модуля вещественных и мнимых частей магнитного типпера. Анализ данных на рисунке 4.1 свидетельствует о наличии периодичностей во временных вариациях магнитного типпера. Наиболее ярко проявляются годовые вариации в поведении модулей индукционных стрелок, что подтверждается спектральной оценкой, результаты которой в виде периодограмм приведены на рисунке 4.2. Согласно результатам работ [97, 99, 101-102] годовые вариации модулей мнимых индукционных стрелок характеризуют вариации электропроводности проводящего слоя, в котором концентрируются электрические токи, вызванные индукцией. Это позволяет предполагать, что выделенная в настоящей работе годовая периодичность связана с наличием мощного проводящего слоя. Представленные на рисунке 4.2 периодограммы и на рисунке 4.3 результаты вейвлет-преобразования свидетельствуют о том, что интенсивность периодических вариаций магнитного типпера не постоянна во времени. Наряду с годовой периодичностью наблюдаются хорошо выраженные полугодовая, двухнедельная, 27-суточная и 60-суточная периодичности магнитного типпера. В настоящее время

источник периодичности с периодом 60 суток не установлен, это требует проведения дополнительных исследований. Наличие двухнедельной (~14 сут) и околосесячной (~27 сут) периодичностей можно связать с влиянием на вариации магнитного типпера приливных волн M_f и M_m , при этом изменение электропроводности земной коры под воздействием приливных деформаций, вероятно, связано с изменением степени взаимосвязи микрообъемов водных флюидов в породах. Временные вариации компонент магнитного типпера различаются на разных периодах, что демонстрирует сложность подповерхностной среды как в латеральном, так и вертикальном направлениях.

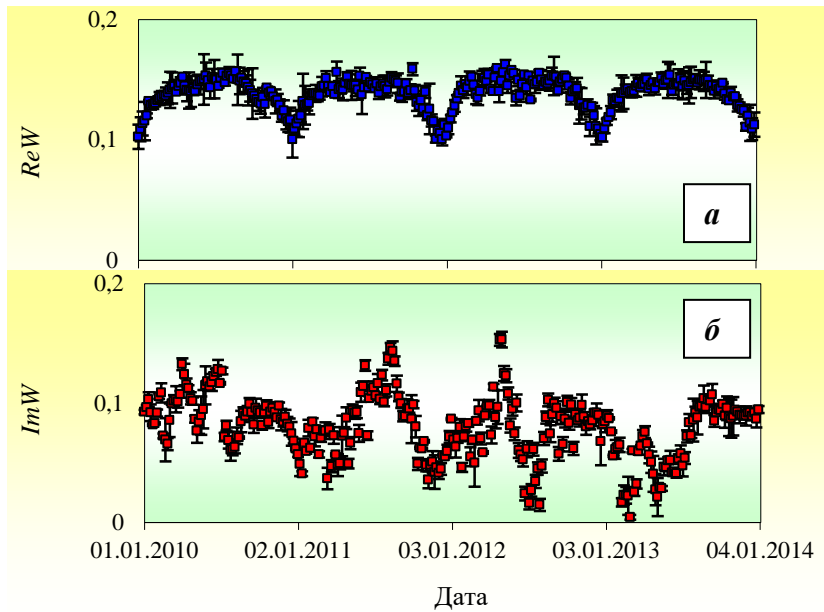


Рисунок 4.1 – Вариации вещественной (*a*) и мнимой (*б*) компонент магнитного типпера с доверительными интервалами на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

Следует отметить сложность определения причин периодических вариаций магнитного типпера, поскольку они могут быть вызваны как изменением параметров внешних источников¹, так и изменением подземной электропроводности и литосферной эмиссией электромагнитного поля, в частности, из-за годового вращения Земли вокруг Солнца, вследствие чего меняется степень трещиноватости и насыщенности флюидами земной коры [99, 101]. Сезонные изменения магнитного типпера могут быть обусловлены изменением электропроводности неоднородностей и вмещающей среды

¹ В настоящей работе, вклад внешних источников в вариации магнитовариационных параметров минимизировался применением специальной методики вычисления магнитотеллурических функций (метод разделения сигнал-шум). Кроме того, применение этой методики позволяет подавлять индустриальные и аппаратные помехи.

вследствие сезонной вариации солнечной энергии, влияющих на температурный режим земной коры

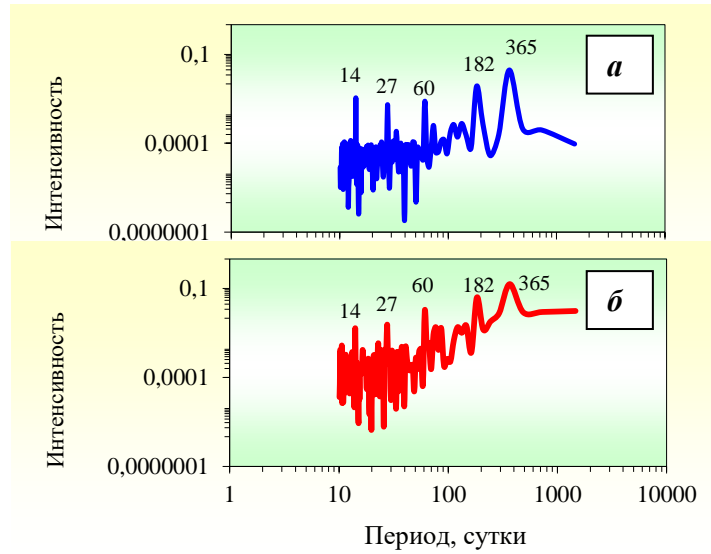


Рисунок 4.2 – Периодограммы модулей вещественной (а) и мнимой (б) компонент магнитного типпера на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

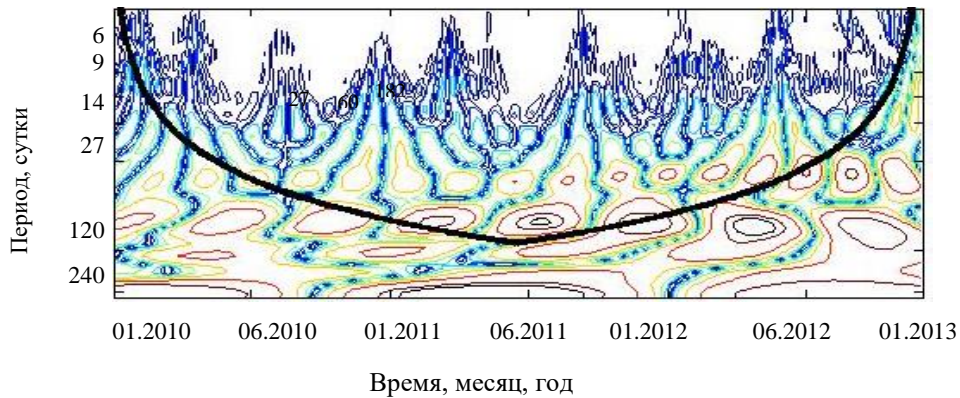


Рисунок 4.3 – Результаты вейвлет-анализа магнитуды магнитного типпера на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

Вариации магнитного тензора. Характеристики магнитного тензора определялись с использованием результатов наблюдений вариаций геомагнитного поля на обсерваториях "Михнево" и "Борок" в период с 2010 г. по 2013 г. Анализ показал, что компоненты магнитного тензора определяются устойчиво на временном интервале равном 5 суткам (с дискретизацией 1 мин). В качестве примера на рисунке 4.4 приведены результаты расчета компонент магнитного тензора.

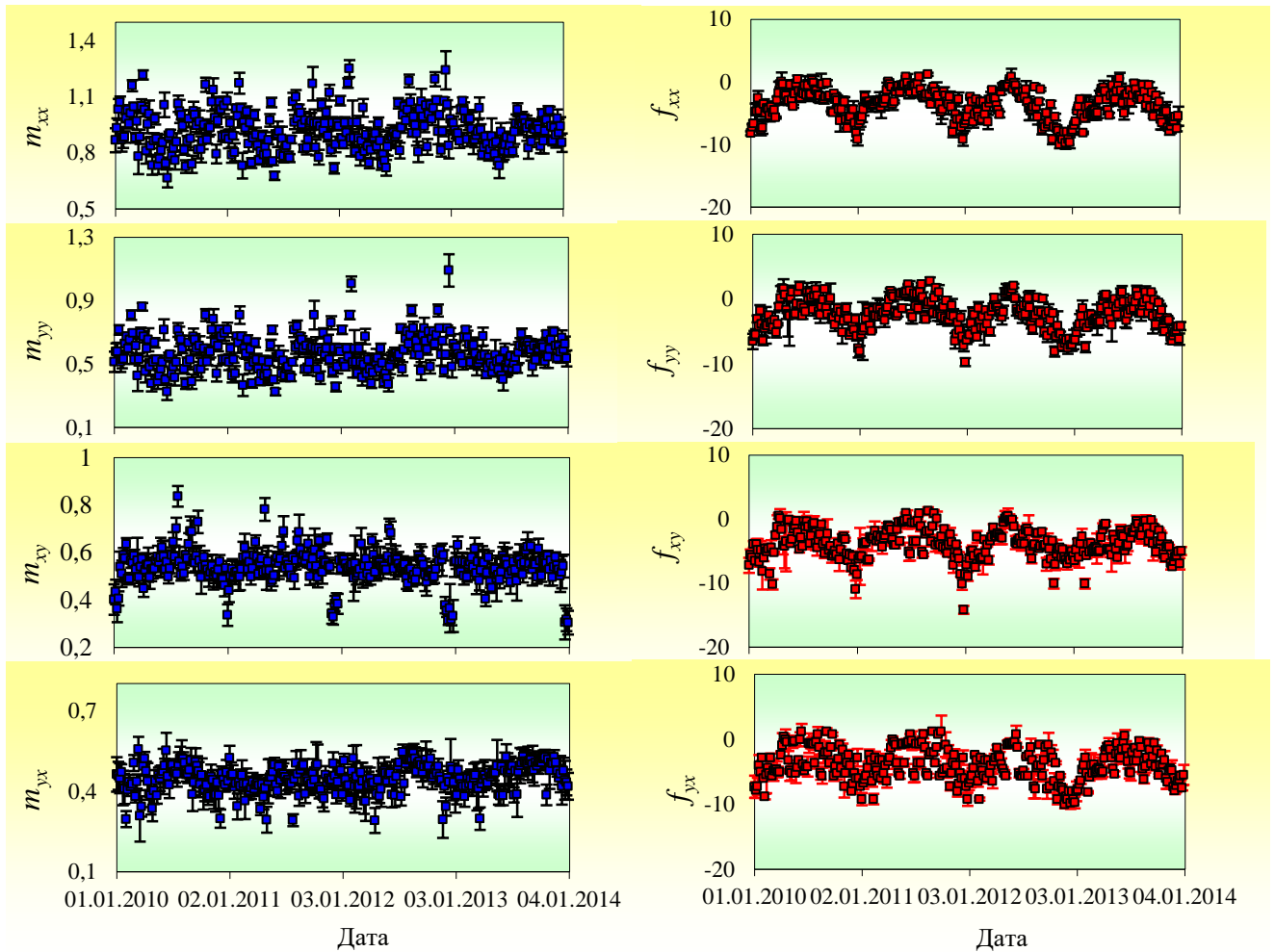


Рисунок 4.4 – Вариации модулей $|m|$ (слева) и фаз f (справа) основных и дополнительных компонент² магнитного тензора с доверительными интервалами на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

Более детальный анализ свидетельствует о том, что вариации основных компонент и их фаз характеризуются меньшей дисперсией по сравнению с дополнительными компонентами и их фазами. Характерно, что в поведении компонент магнитного тензора выражены годовые вариации, которые по амплитуде в целом превышают дисперсию в 3 – 5 раз. Более четко годовые вариации проявляются в вариациях фаз основных компонент (на рисунке 4.5 приведены периодограммы компонент магнитного тензора). Здесь следует отметить, что поскольку изменение электропроводности земной коры определяется процессами, протекающими в твердых оболочках Земли, выделенные годовые вариации магнитовариационных параметров на примере магнитного типпера и магнитного тензора могут быть обусловлены

² $|m_{xx}|$ и $|m_{yy}|$ – модули основных компонент магнитного тензора; $|m_{xy}|$ и $|m_{yx}|$ – модули дополнительных компонент магнитного тензора; f_{xx} и f_{yy} – фазы основных компонент магнитного тензора; f_{xy} и f_{yx} – фазы дополнительных компонент магнитного тензора

геодинамическими процессами в земной коре, которые характеризуются периодичностями, близкими к 1 году, например, связанными с вращением Земли вокруг Солнца.

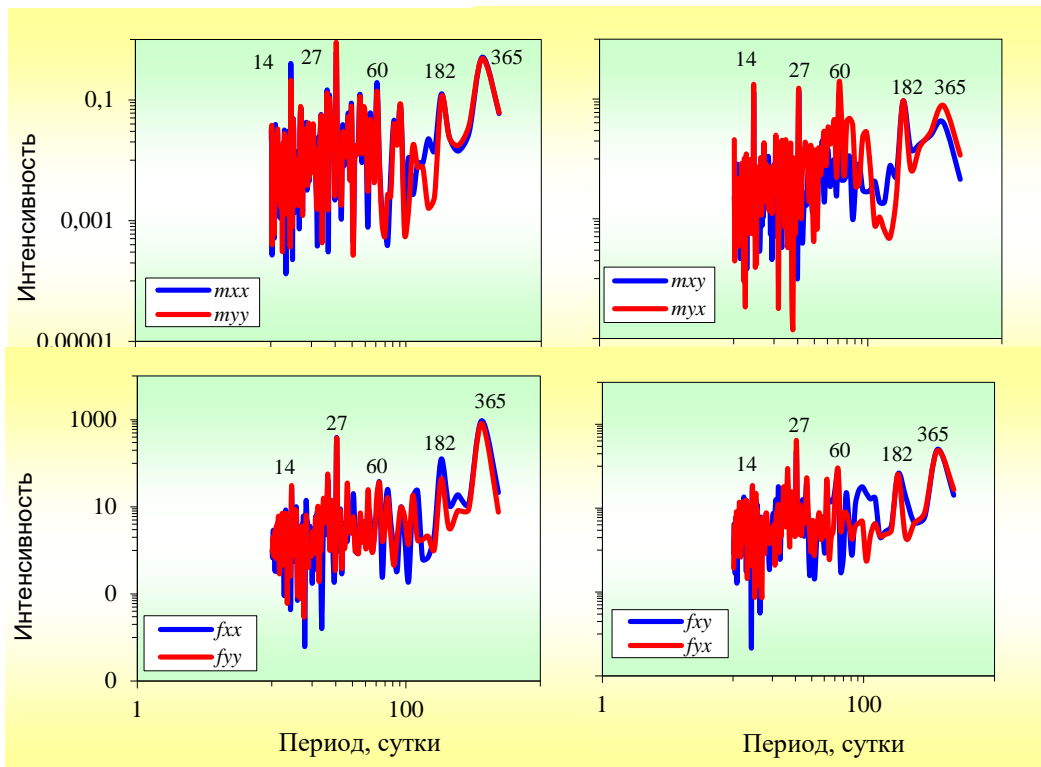


Рисунок 4.5 – Периодограммы модулей ($|m|$) и фаз (f) основных и дополнительных компонент магнитного тензора на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

Наряду с годовой периодичностью, как и в случае магнитного типпера, для временных вариаций магнитного тензора характерны хорошо выраженные полугодовая, 60-, 27- и 14-суточные периодичности (рисунок 4.5). Также как в случае магнитного типпера, нет однозначного представления о причинах периодических вариаций магнитного тензора, поскольку они могут быть обусловлены как изменением внешнего источника, так и изменением параметров твердой среды (например, водонасыщенности). Можно предположить, что изменение уровня подземных вод в сильно обводненном регионе может заметно влиять на изменение электропроводности, и, как следствие, привести к сильным изменениям величины магнитотеллурических функций (например, магнитуды магнитного типпера).

4.2. Закономерности длиннопериодных изменений режима подземных вод

Данные многолетнего мониторинга уровня каширского безнапорного водоносного горизонта, проводимого в открытой скважине, использовались для анализа длиннопериодных изменений режима подземных вод территории Геофизической обсерватории "Михнево". Каширский водоносный горизонт был выбран не случайно, а так как в пределах северного геоблока – территории расположения обсерватории "Михнево" – этот горизонт безнапорный. Соответственно, уровень подземных вод в скважине определяет мощность обводненной толщи пород, т.е. при вариациях уровня воды изменяется толщина слоя горных пород с более высокой электрической проводимостью.

На рисунке 4.6 представлены результаты регистрации среднесуточных значений уровня подземных вод в открытой скважине на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

В соответствии с принципами гидрогеологического районирования территория расположения обсерватории "Михнево" относится к провинции сезонного (преимущественно весеннего и частично осеннего) питания подземных вод и области умеренного дренирования с глубиной эрозионного вреза до 200 м. Режим первого от поверхности каширского безнапорного водоносного горизонта трещинно-порового типа, близок к естественному, и зависит от гидрологического режима поверхностных водотоков и метеорологических характеристик.

На представленном графике (рисунок 4.6) четко прослеживается плавный сезонный ход вариаций уровня подземных вод: предвесенний спад, весенний подъем, глубокий летний спад и частичный осенний подъем уровней. Весенний максимум обычно достигается позже зафиксированного экстремума в реке, так как подземные воды получают питание не только за счет паводковой волны, но и за счет площадной инфильтрации атмосферных осадков, в том числе весеннего снеготаяния.

В период летней межени эпизодически наблюдается кратковременный подъем уровня воды из-за дождей. В осенний период амплитуды подъема уровня зависят от общего количества атмосферных осадков, снижение уровня обусловлено началом промерзания грунтов. Следует отметить, что иногда также отмечается кратковременное повышение уровня подземных вод, связанное с оттепелями в зимнее время.

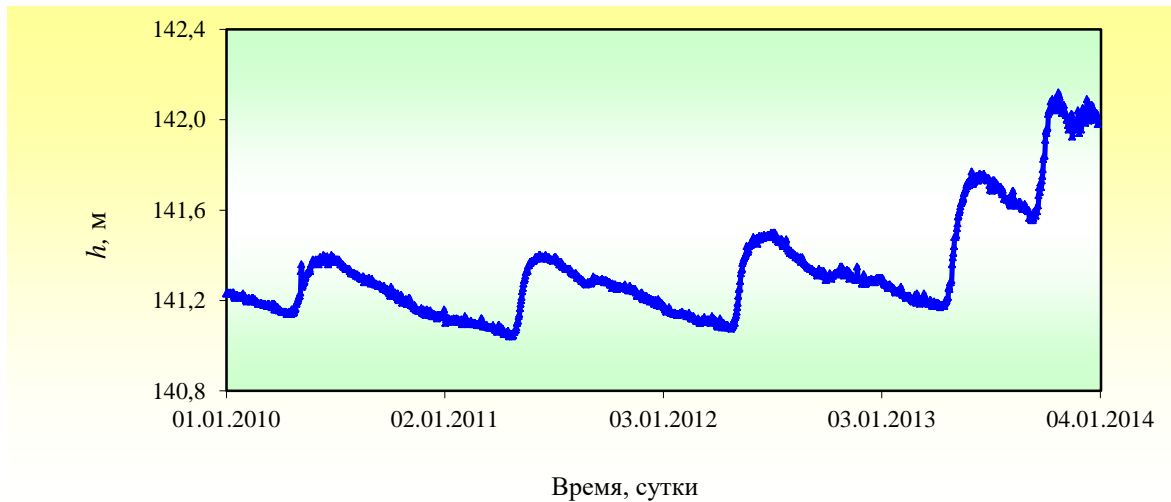


Рисунок 4.6 – Вариации уровня подземных вод каширского водоносного горизонта на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

Анализ периодической составляющей уровня подземных вод – периодограмма среднесуточных значений (рисунок 4.7) и результаты вейвлет-анализа среднесуточных значений (рисунок 4.8) – позволяют выделить в спектре вариаций уровня подземных вод ярко выраженные спектральные пики, свидетельствующие о наличии периодичностей в вариациях уровня подземных вод. Наряду с годовой цикличностью (ход которой описан выше), наблюдаются периодичности уровня подземных вод $\sim 27,5$, $13,5$ сут, соответствующие приливным волнам M_m , и M_f и полугодовая периодичность. Соответственно, отмеченные периодичности подтверждают влияние земных приливов на уровень водоносного горизонта [6-7, 47, 50, 81, 91, 295, 416, 643]. Деформирование среды в приливной волне приводит к существенному изменению ее микро- и макроструктуры. Действительно, увеличение приливной силы вызывает деформации, связанные с увеличением объема среды и, следовательно, – увеличение ее пористости, а значит и проницаемости. Уменьшение приливной силы наоборот вызывает сжатие среды, т.е. уменьшение ее проницаемости. Сменяющийся попеременно характер деформирования среды естественным образом приводит к периодическим вариациям режима подземных вод.

Одной из причин вариаций уровня подземных вод (наряду с естественными условиями питания и разгрузки водоносного горизонта) является изменение напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород, в частности, современные геодинамические процессы (прохождение сейсмических волн от землетрясений) [49, 217, 649, 663], а также изменение барометрического давления [50,

90, 232, 380]. Спектральные гармоники с периодами 3, 4 и 5 сут на рисунке 4.7, вероятно, обусловлены вариациями атмосферного давления.

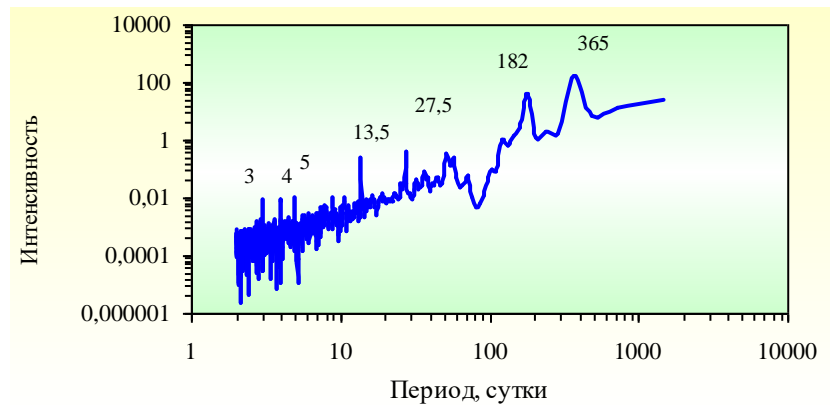


Рисунок 4.7 – Периодограмма уровня подземных вод на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

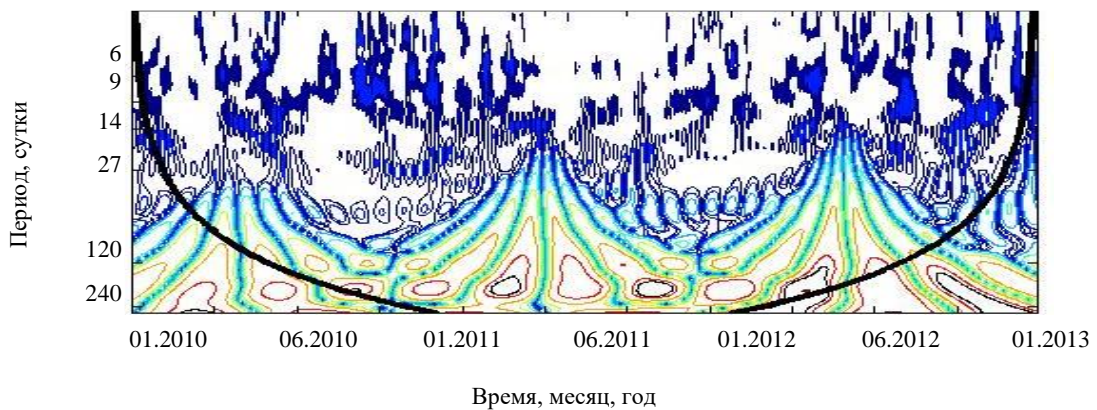


Рисунок 4.8 – Результаты вейвлет-анализа уровня подземных вод на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

4.3. Совместные вариации магнитного типпера и уровня подземных вод

Механизм образования вариаций электропроводности может быть объяснен как изменениями трещиноватости или пористости пород, особенностями их структуры или текстуры, наличием флюидов, минерализацией водных растворов, изменением температуры и давления, то есть тех факторов, которые оказывают влияние на изменение электрических свойств пород, так и различными по своей природе процессами – такими как пьезоэлектрический эффект, тектономагнитный эффект, электризация горных пород при их разрушении и др., вызывающими изменения амплитудно-частотных характеристик естественных электромагнитных полей [82, 257].

При этом изменение уровня подземных вод в сильно обводненном регионе должно заметно влиять на изменение электропроводности, как следствие привести к сильным изменениям величины магнитного типпера.

На рисунке 4.9 представлены результаты оценки магнитуды магнитного типпера и абсолютного уровня подземных вод безнапорного горизонта, которые демонстрируют синхронность их изменений. Зависимость между вариациями магнитного типпера T и уровня подземных вод h в открытой скважине приведена на рисунке 4.10. Данные рисунка 4.10 свидетельствуют о практически линейной связи между T и h . С достаточной для оценок точностью зависимость $T(h)$ представима в виде:

$$T(h) = -0,0327h + 4,74004. \quad (4.1)$$

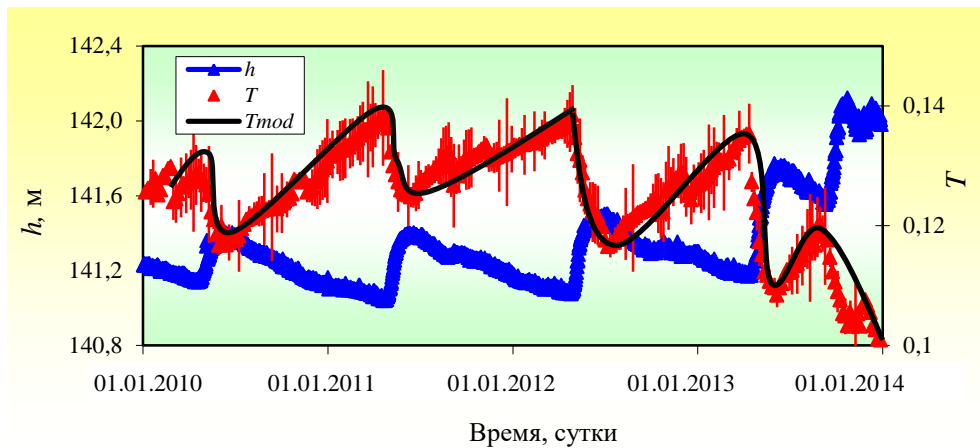


Рисунок 4.9 - Вариации уровня безнапорного водонасыщенного горизонта h и магнитуды магнитного типпера³ T на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг. Черной линией показан результат численного моделирования T_{mod}

Подтверждение и проверка достоверности статистической значимости соотношения (4.1) между амплитудами T и h выполнялись на основе метода суррогатных рядов данных. В настоящей работе при анализе корреляционных соотношений использовались подходы Кенделла, Спирмена и Пирсона, коэффициент корреляции вычислялся как для оригинальных, так и для суррогатных рядов. На рисунке 4.11 приведены результаты вычисления коэффициентов корреляции в виде гистограмм (по оси ординат приведено количество реализаций с данным коэффициентом корреляции). Значения коэффициентов корреляции исходных рядов не попали в интервалы значений коэффициентов корреляции суррогатных рядов, можно утверждать, что существует корреляционная зависимость между вариациями T и h .

³ Вертикальными линиями показаны доверительные интервалы вычисленной магнитуды магнитного типпера

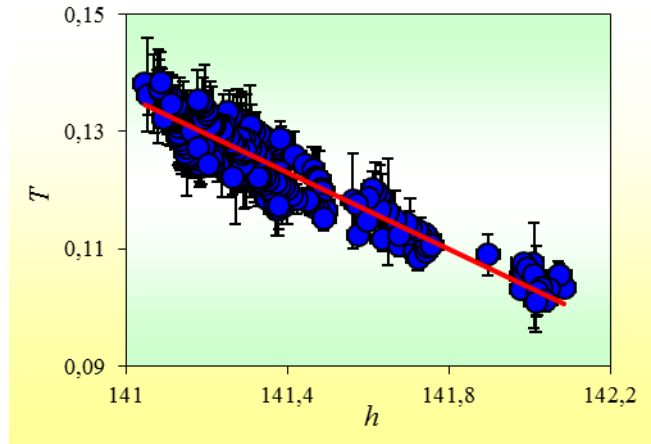


Рисунок 4.10 - Зависимость между магнитудой магнитного типпера T и уровнем подземных вод h на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

Значения коэффициентов корреляции R и детерминации R^2 между магнитудой магнитного типпера T и уровнем подземных вод h при статистической значимости ≤ 0.01 : являются относительно высокими (Кендалла $R = -0,94$, $R^2 = 88,4\%$; Пирсона $R = -0,97$, $R^2 = 94,1\%$; Спирмена $R = -0,76$; $R^2 = 57,8\%$), что позволяет утверждать, что рассматриваемые процессы характеризуются значимой корреляцией между T и h .

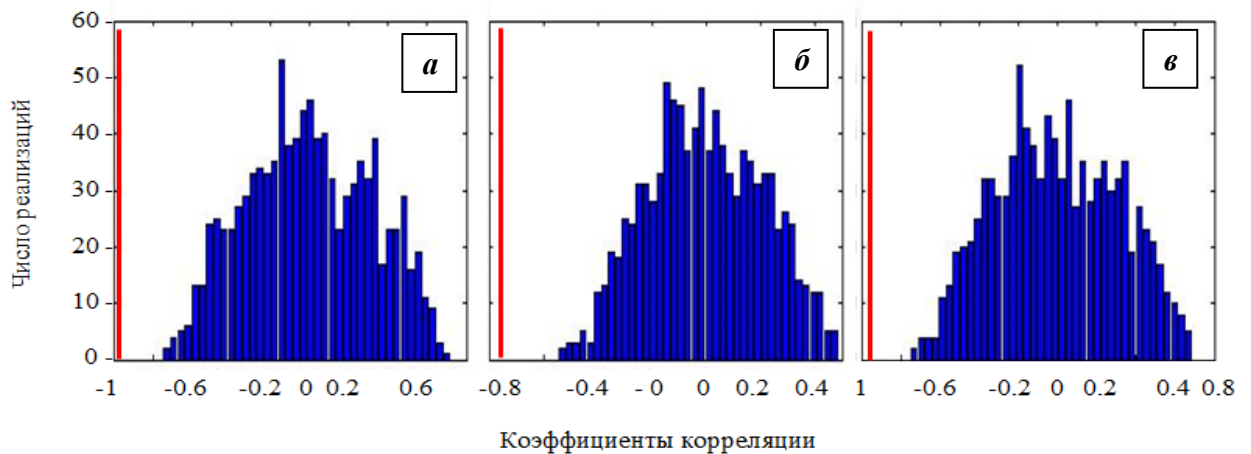


Рисунок 4.11. Гистограммы, демонстрирующие корреляцию суррогатных рядов данных с использованием разных подходов: а) Спирмена; б) Кендалла; в) Пирсона. Вертикальными красными линиями обозначены значения коэффициентов корреляции для исходных рядов данных

На рисунке 4.9 приведены результаты численного моделирования вариаций магнитного типпера, связанных с изменением величины водонасыщенного слоя, и магнитного типпера, рассчитанного по компонентам магнитного поля на земной поверхности. Данные рисунка свидетельствуют о совпадении рассматриваемых

величин, что подтверждает гипотезу о зависимости изменения магнитного типпера от вариаций уровня подземных вод.

Выводы к главе 4:

По данным наблюдений вариаций геомагнитного поля, полученным на Геофизических обсерваториях "Михнево" и "Борок", проанализированы временные вариации магнитовариационных параметров (магнитный типпер и магнитный тензор). В их поведении выявлены годовые вариации. В магнитном тензоре годовые вариации в большей мере проявились в поведении фаз основных компонент. Наряду с годовой периодичностью наблюдаются вариации магнитовариационных параметров с полугодовой периодичностью и периодами 14, 27, 60 сут. Для условий обсерватории "Михнево", где выполняются гидрогеологические наблюдения, установлена линейная зависимость между амплитудой (магнитудой) магнитного типпера и уровнем подземных вод в открытой скважине. Это подтверждает и численное моделирование.

Третье защищаемое положение: Изменение уровня подземных вод безнапорного горизонта сопровождается вариациями магнитного типпера, отмечается линейная зависимость между уровнем подземных вод и магнитудой магнитного типпера.

ГЛАВА 5. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ ИМПУЛЬСНОГО ТИПА И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА

5.1. Некоторые статистические характеристики геомагнитных вариаций импульсного типа.

Анализ геомагнитных данных, полученных за период наблюдений с 2008 по 2015 гг., показал, что на Геофизической обсерватории "Михнево" наблюдаются импульсные геомагнитные вариации нескольких основных типов: 1) геомагнитные вариации с внезапным началом (*SSC*-события), когда отчетливо регистрируется достаточно кратковременный (длительностью 20 – 120 мин) положительный импульс, который предшествует стадии продолжительных вариаций магнитного поля (пример приведен на рисунке 5.1а); 2) внезапный импульс, когда локальные геомагнитные вариации не развиваются (*SI*-события) (пример приведен на рисунке 5.1б), 3) внезапный импульс на фоне сформировавшихся локальных геомагнитных вариаций (*SMI*-событие⁴) (пример приведен на рисунке 5.1в). Помимо основных перечисленных выделяются и другие типы геомагнитных вариаций: магнитные бури с постепенным началом; магнитные бури с несколькими одиночными импульсами типа внезапного начала; цуг одиночных внезапных импульсов и т.д. Здесь следует отметить, что в настоящей работе наряду с геомагнитными возмущениями, для которых $K \geq 4$, традиционно рассматриваемыми как магнитные бури, анализировались геомагнитные возмущения импульсного типа с $K = 3$ (возмущенное состояние геомагнитного поля), амплитуда которых превышала 10 нТл, поскольку диапазоны амплитуд ряда геомагнитных возмущений с разными значениями индекса K , как это следует из данных таблицы 5.1, заметно пересекаются.

Совместный анализ статистики импульсных геомагнитных вариаций всех типов свидетельствует о том, что геомагнитные вариации доминирующих типов *SSC* и *SI* (количество которых составило примерно половину от общего количества) характеризуются хорошо выраженной временной периодичностью геомагнитных импульсов. Это хорошо видно из рисунка 5.2, на котором приведена кумулятивная статистика импульсных геомагнитных вариаций доминирующих типов за период 2008 – 2015 гг. по месяцам. Основное количество указанных геомагнитных вариаций

⁴ Обозначение введено в данной работе

наблюдается на обсерватории "Михнево" в весенний и осенний периоды (март-апрель и сентябрь-октябрь). Более детальный анализ показывает, что в целом аналогичная зависимость наблюдается отдельно для геомагнитных вариаций разной интенсивности (рисунок 5.3).

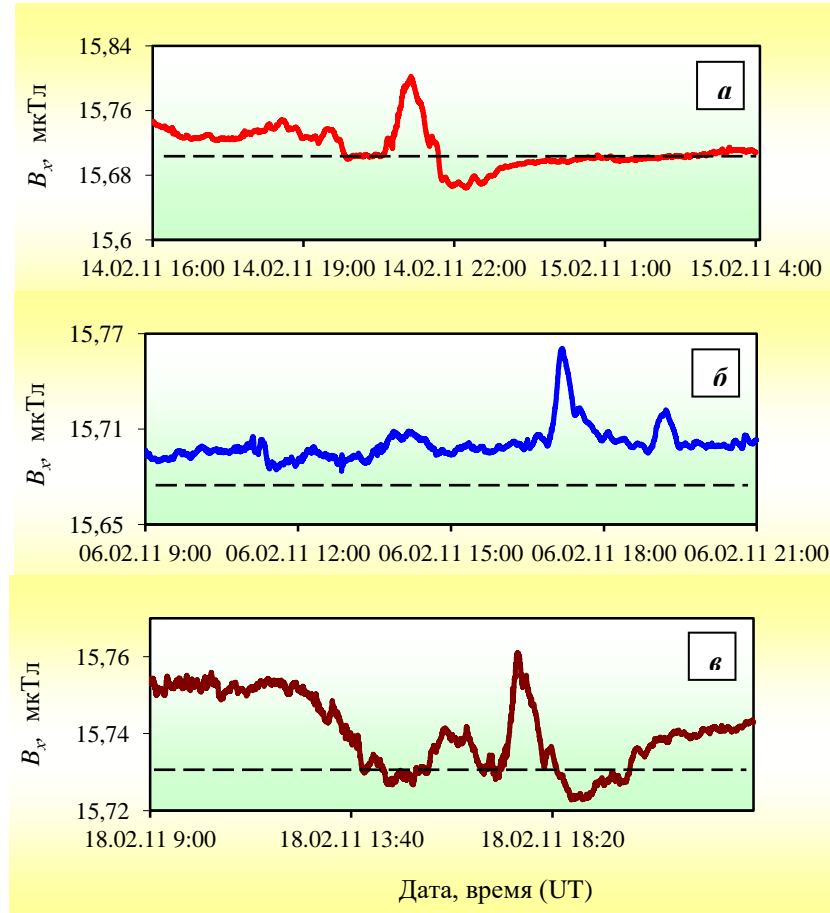


Рисунок 5.1 – Различные типы геомагнитных вариаций (B_x -компонента) на обсерватории "Михнево" за период 2008 – 2015 гг. а) SSC-событие в период магнитной бури $K = 5$; б) SI-событие в период магнитной бури $K = 4$; в) SMI-событие в период магнитной бури $K = 3$

Таблица 5.1. Амплитуда геомагнитных вариаций импульсного типа для событий, характеризующихся разным локальным K -индексом на обсерватории "Михнево"

K	Диапазон амплитуд геомагнитных вариаций, нТл						
	10 – 40	40 – 60	60 – 80	80 – 100	100 – 150	150 – 200	200 – 300
3	■						
4		■					
5		■					
6				■			
7					■		

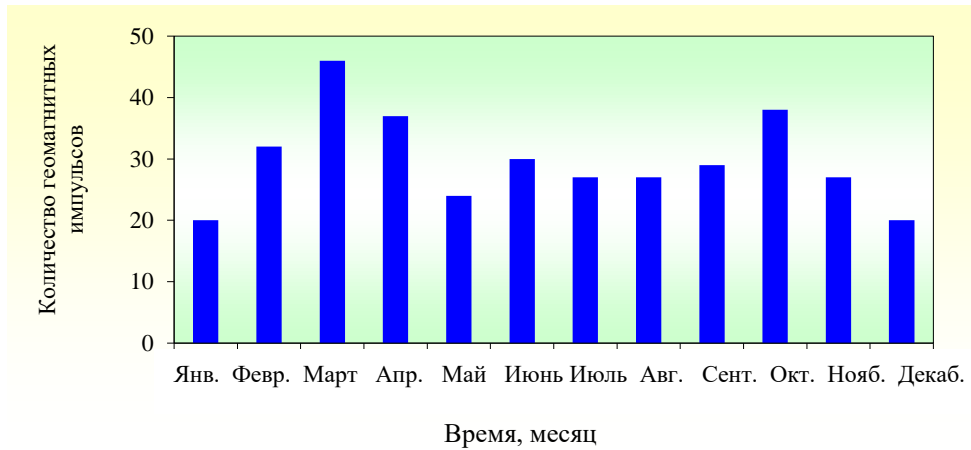


Рисунок 5.2 – Кумулятивная статистика геомагнитных вариаций импульсного типа по месяцам на обсерватории "Михнево"

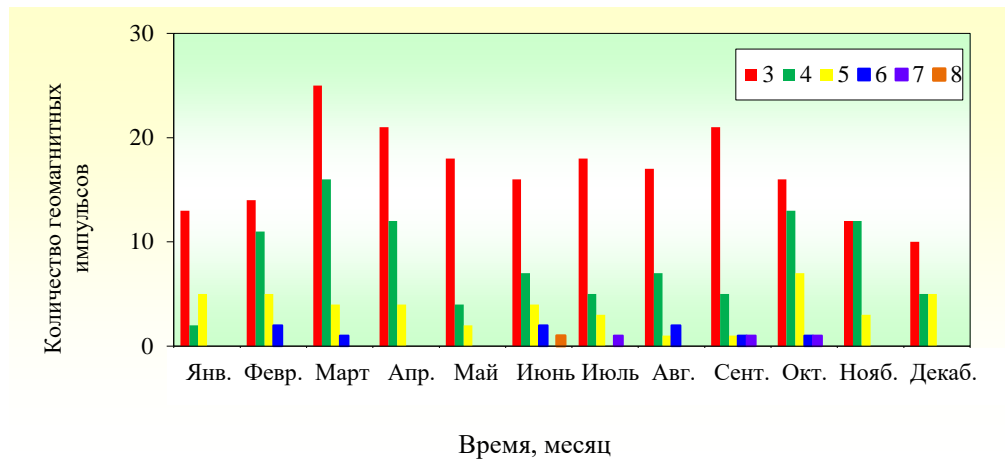


Рисунок 5.3 – Статистика геомагнитных вариаций импульсного типа по месяцам на обсерватории "Михнево"

Анализ геомагнитных вариаций импульсного типа показал, что их амплитуда и продолжительность меняются в широком диапазоне, преобладают вариации с амплитудой 20 – 80 нТл (рисунок 5.4а), геомагнитные вариации с малой и большой продолжительностью по времени наблюдаются редко, в основном наблюдаются вариации в диапазоне 40 – 100 мин (рисунок 5.4б). Статистика геомагнитных вариаций импульсного типа по времени начала импульса (рисунок 5.4в) свидетельствует о том, что геомагнитные вариации импульсного типа возникают, в основном, в дневное время по местному времени.

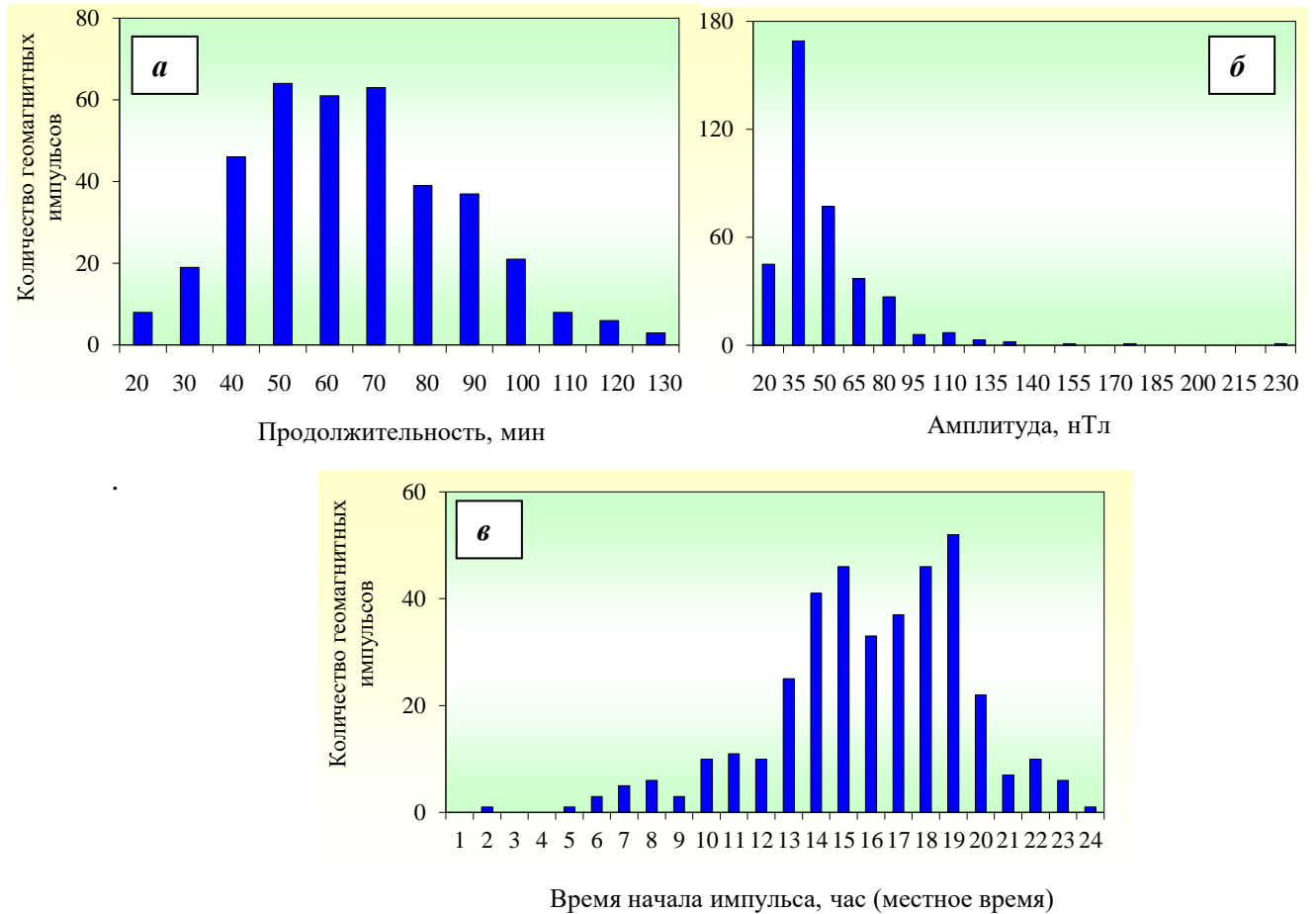


Рисунок 5.4 – Статистика геомагнитных вариаций импульсного типа по амплитуде, продолжительности и по времени начала импульса на обсерватории "Михнево"

5.2. Особенности микросейсмического фона.

В целом, микросейсмический фон на Геофизической обсерватории "Михнево" представляет собой малые колебания твердой поверхности Земли и является суперпозицией несвязанных между собой независимых колебательных процессов от различных, как по положению, так и по природе, сейсмических источников.

Результаты обработки данных сейсмической регистрации, выполненной на обсерватории "Михнево", свидетельствуют о сложном характере изменения амплитуды и спектра фоновых микросейсмических колебаний со временем. Средние значения микросейсмического фона в диапазоне частот 0,01 – 1 Гц зависят от сезона и изменяются в диапазоне 0,15 – 0,22 мкм/с в летний период и 0,29 – 0,35 мкм/с в осенне-зимний период. Максимум суточных вариаций микросейсмического фона приходится

примерно на 10 – 11 час, минимум приурочен к 3 – 4 час местного времени. В целом, суточные вариации микросейсмического фона нестабильны во времени, наблюдается перемежаемость периодов деградации и увеличения интенсивности этих вариаций.

В разных частотных диапазонах наблюдаются разные периодичности микросейсмического фона. В низкочастотном микросейсмическом шуме (0,1 – 0,5 Гц) выделяются периодичности с периодами примерно две недели, примерно 27, 45, 60 суток, полгода и год (рисунок 5.5а), в высокочастотном (6 – 8 Гц) наилучшим образом проявляются полусуточная, суточная и недельная периодичности (рисунок 5.5б), а также двухнедельная и околосесячная периодичности. Наличие двух последних периодичностей связано с влиянием на микросейсмический фон приливных волн M_f и M_m . Кроме того, приливным воздействием (солнечные приливные волны S_a и S_{sa}) могут быть объяснены годовая и полугодовая периодичности.

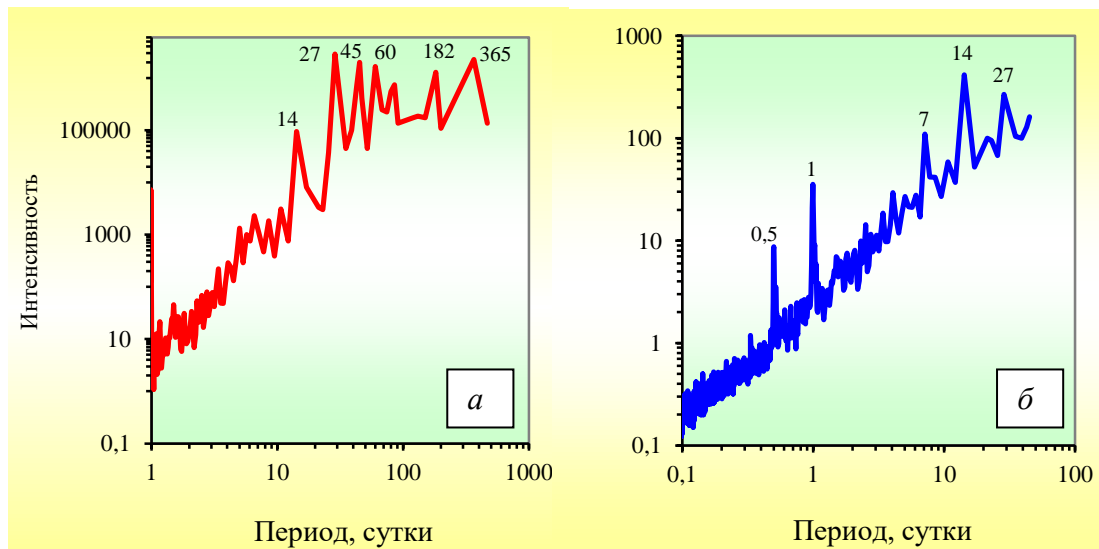


Рисунок 5.5 – Пример спектров мощности микросейсмического фона на обсерватории "Михнево" (средний за период 2008 – 2015 гг.); диапазон частот: а – 0,1 – 0,5 Гц; б – 6 – 8 Гц

При этом следует отметить, что выделенные периодичности характерны также для отдельных составляющих микросейсмического фона. В качестве примера на рисунке 5.6 представлена периодограмма вариаций микросейсмического фона, которая демонстрирует наличие полусуточной и суточной компонент, характерных для твердоприливной деформации [78, 150, 152].

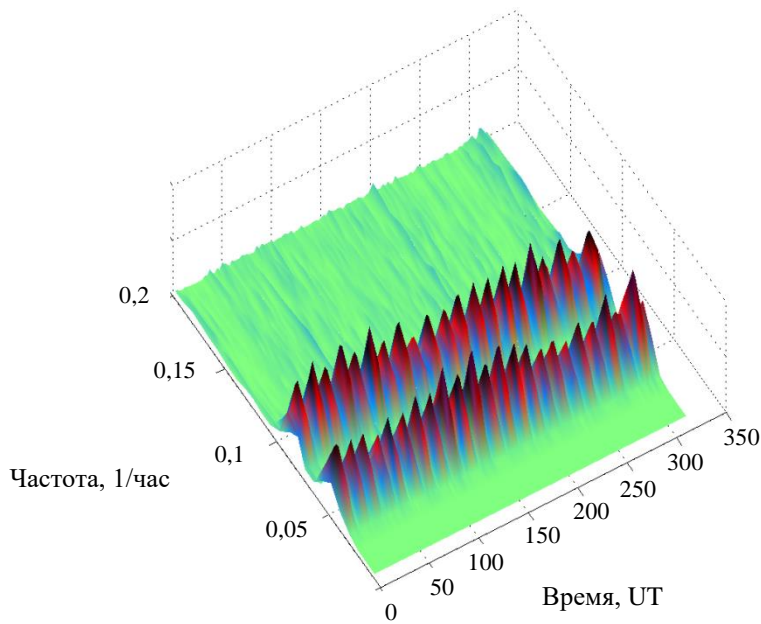


Рисунок 5.6 – Периодограмма скорости смещений в сейсмическом фоне на обсерватории "Михнево".

Помимо лунно-солнечных приливов существенное влияние на микросейсмические колебания оказывают барические флуктуации в атмосфере, сопутствующие метеорологическим явлениям (циклоны, дожди, град, ураганы, грозы, прохождение атмосферных фронтов) [4, 36, 86, 92], слабые импульсные колебания местного происхождения (следствие релаксационных процессов, протекающих в среде) [151], техногенная деятельность – промышленные взрывы, движущийся транспорт [170], колебания зданий и сооружений [180] и т.д.

С учетом вышеизложенного в настоящей работе при исследовании связи между геомагнитными вариациями импульсного типа и вызванными вариациями микросейсмического фона анализировались участки синхронных вариаций геомагнитного поля и сейсмических колебаний, полученных в отсутствие не только значимых атмосферных явлений (прохождение атмосферных фронтов, осадки и т.д.), но также в отсутствие сигналов, вызванных землетрясениями, взрывами и другими техногенными источниками. Выбор анализируемых периодов осуществлялся с использованием метеорологической информации, получаемой с метеостанции Геофизической обсерватории "Михнево", каталогов землетрясений и взрывов.

5.3. Вариации микросейсмического фона, вызванные действием геомагнитных импульсов

Синхронные вариации микросейсмического фона и геомагнитных импульсов.

Обработка и анализ синхронных данных регистрации изучаемых полей показали, что геомагнитные вариации типов *SSC* и *SI* сопровождаются ярко выраженными во времени амплитудными вариациями сейсмического фона. При этом хорошо выделяются синхронные вариации полей. Для других типов геомагнитных вариаций импульсного типа эффект выглядит существенно сложнее. В этих случаях возмущения могут быть представлены множественными вариациями, и тогда, сложно характеризовать их какой-то одной амплитудой, или выполнять согласование вариаций разных полей по времени. Нельзя исключать, что геомагнитные вариации разного типа по-разному могут влиять на геодинамику верхних участков земной коры.

Спектральный анализ показывает, что вызванные вариации микросейсмического фона наблюдаются в основном в частотном диапазоне 0,01 – 0,1 Гц, в отдельных случаях в диапазоне частот 0,001 – 0,1 Гц. При этом необходимо отметить, что указанные вариации имеют сложный характер и зависят от конкретного геомагнитного возмущения. Примеры вызванных вариаций микросейсмического фона демонстрирует рисунок 5.7, на котором приведены соответствующие СВАН диаграммы для периодов времени, когда наблюдались геомагнитные возмущения.

Как это видно из рисунка 5.7, наблюдаются как короткие по времени вызванные вариации микросейсмического фона (случай *SI*-импульсов), так и весьма продолжительные (*SSC*-импульсы, предваряющие сильную магнитную бурю). Вызванные вариации микросейсмического фона проявляются с началом геомагнитных вариаций. Максимум амплитуды вызванных вариаций микросейсмического фона, как правило, совпадает 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 5.7в).

При установлении зависимости между интенсивностью геомагнитных вариаций и откликом сейсмического фона рассматривались события, для которых амплитуды геомагнитных импульсов и вызванных вариаций микросейсмического фона определялись однозначно. На рисунке 5.8 приведен пример прямого сопоставления

геомагнитных вариаций и вызванных вариаций микросейсмического фона для одного из событий.

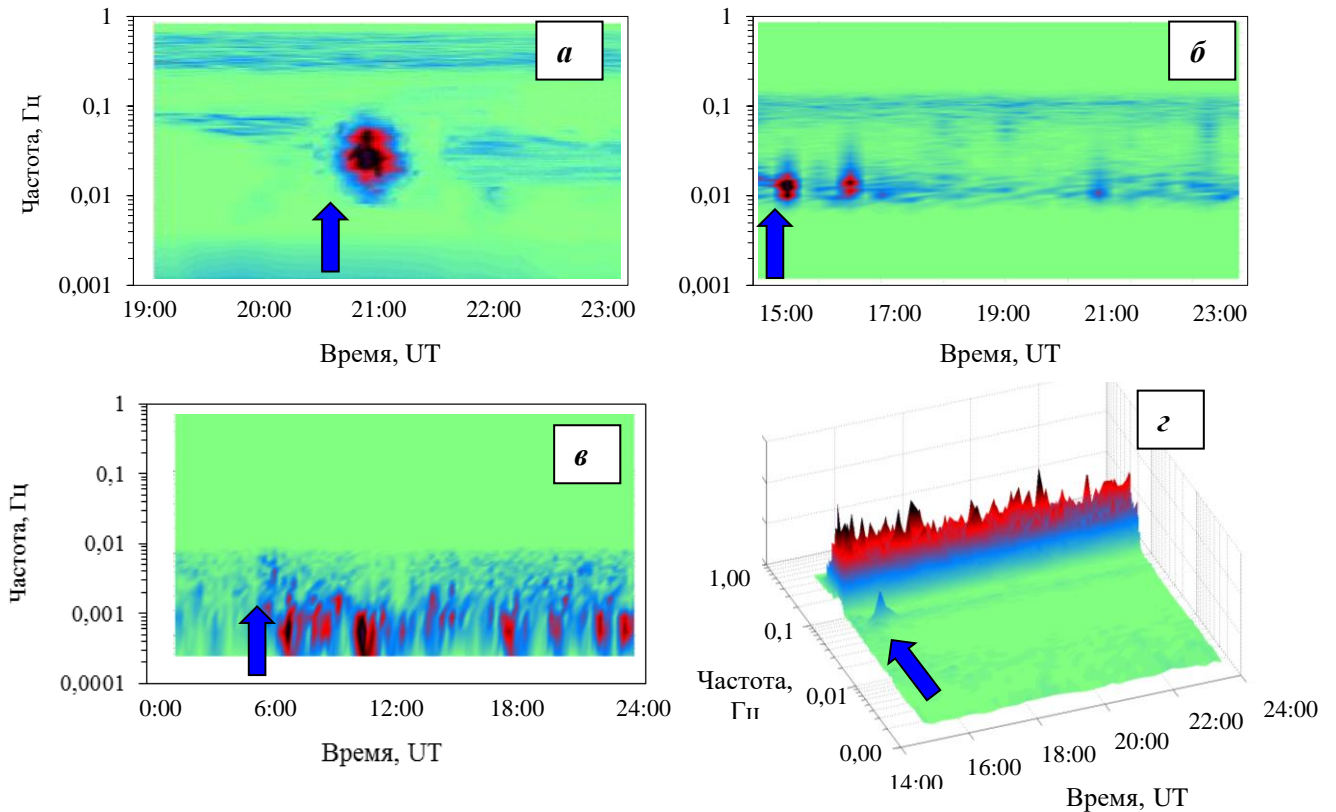


Рисунок 5.7 – СВАН диаграммы вариаций микросейсмического фона, зарегистрированных в разные периоды геомагнитных возмущений (начало обозначено вертикальными залитыми стрелками). Параметры геомагнитных возмущений: *a* – 26.12.2015 г. – $K=5$; $B=67$ нТл; *б* – 30.04.2008 г. – $K=4$; $B=37$ нТл; *в* – 29.09.2011 г. – $K=6$; $B=120$ нТл; *г* – 04.02.2011 г. – $K=4$; $B=22$ нТл (изометрическая проекция⁵)

Итоговые результаты сопоставления амплитуд геомагнитных вариаций и вызванных вариаций сейсмического фона приведены на рисунке 5.9. Несмотря на значительный разброс, экспериментальные данные в целом демонстрируют увеличение вариаций амплитуды сейсмического фона ν с увеличением амплитуды геомагнитных импульсов B .

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

$$\nu = 0,35 \{1 - \exp [-0,007 B]\} \quad \text{мкм/с.} \quad (5.1)$$

⁵ Изометрическая проекция использована в связи с недостаточной выразительностью вариаций

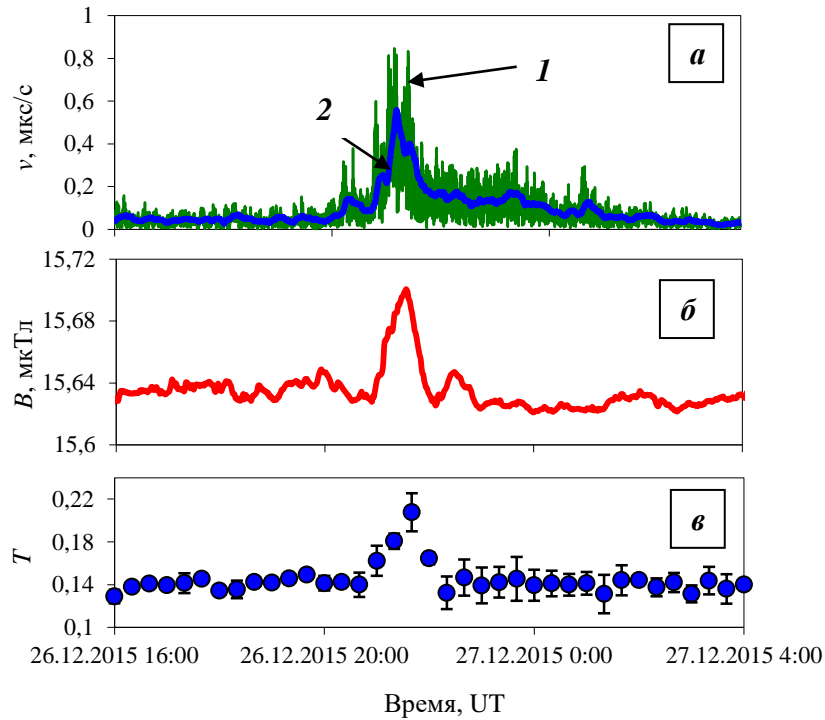


Рисунок 5.8 – Пример синхронных вариаций скорости колебаний в микросейсмическом фоне ν в частотном диапазоне 0,01 – 0,1 Гц (а) , амплитуды геомагнитного импульса (б), магнитуды магнитного типпера (в) на Геофизической обсерватории "Михнево" в период геомагнитной вариации интенсивностью $K = 5$. 1 – вариация амплитуды скорости колебаний в диапазоне частот 0,01 - 1 Гц, 2 – скользящее среднее значение скорости колебаний (усреднение в окне 200 с)

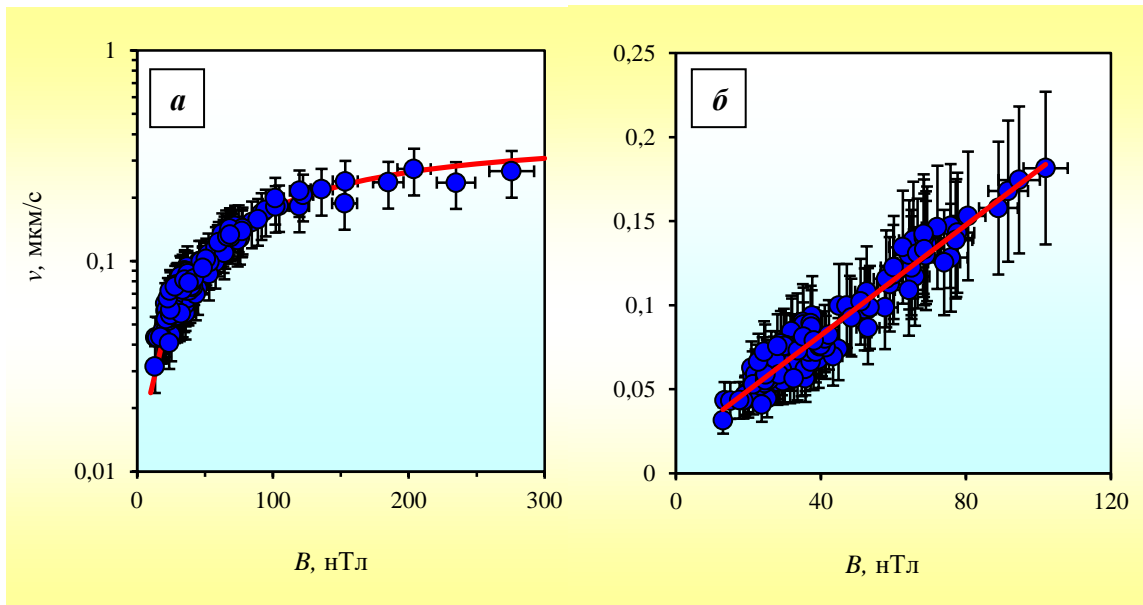


Рисунок 5.9 – Зависимость между среднеквадратичной амплитудой вариаций сейсмического фона ν , наведенных в период геомагнитных вариаций, и амплитудой геомагнитных вариаций импульсного типа B для всех рассматриваемых событий (а) и для событий с низкой амплитудой B (б)

Характер зависимости (5.1) позволяет сделать важный вывод, а именно: возможности среды в преобразовании энергии геомагнитных вариаций в энергию микроколебаний не безграничны. Если при достаточно слабых амплитудах геомагнитных импульсов B (в диапазоне до ~ 100 нТл) амплитуда наведенных вариаций сейсмического поля растет практически линейно с ростом B , то при дальнейшем увеличении B зависимость $\nu(B)$ выполаживается. Это и является свидетельством ограниченных возможностей среды в формировании механического отклика на геомагнитные возмущения: наступает насыщение.

Высокие значения коэффициентов корреляции R (Кендалла 0,78, Пирсона 0,91, Спирмена 0,95) и коэффициентов детерминации R^2 (Кендалла 60,8%, Пирсона 82,8%, Спирмена 90,2%) при статистической значимости ≤ 0.01 : свидетельствуют о значимой корреляции между амплитудами геомагнитных вариаций импульсного типа B и вызванных вариаций микросейсмического фона ν . Дополнительным подтверждением этого служит сильное отличие коэффициента корреляции между исходными рядами ν и B от коэффициентов корреляции между суррогатными рядами, полученными рандомизацией фаз исходных рядов. На рисунке 5.10 в виде гистограмм приведены результаты вычисления коэффициентов корреляции между суррогатными рядами. По оси ординат приведено количество реализаций с конкретными коэффициентами корреляции, отложенными на оси абсцисс.

С целью установления причинно-следственной связи между импульсным изменением магнитного поля Земли и микросейсмическими колебаниями для каждого из рассматриваемых случаев строилась взаимная корреляционная функция между вариацией скорости сейсмических колебаний ν и вариациями напряженности B геомагнитного поля, и проводился причинно-следственный анализ на основе теста Грейнджера (таблица 5.1).

Результаты анализа приводятся на примере событий 30.10.2008 г. и 26.12.2015 г. Взаимная корреляционная функция между ν и B достигает пика при лаге (сдвиге по времени), равном + 12 мин для 30.10.2008 г. и +8 мин для 26.12.2015 г., это означает, что изменения в микросейсмическом шуме появляются через несколько мин после изменения напряженности геомагнитного поля. Анализ причинно-следственной связи на основе теста Грейнджера между среднеквадратичной амплитудой вариаций микросейсмического фона, наведенных в период геомагнитных вариаций, и амплитудой

геомагнитного поля на соответствующих лагах (таблица 5.1) показывает, что изменение амплитуды геомагнитного поля влечет за собой изменение среднеквадратичной амплитуды скорости вариаций микросейсмического фона. Аналогичные результаты были получены и для других рассматриваемых случаев, при этом время запаздывания максимальной амплитуды отклика вариаций микросейсмического фона на геомагнитные возмущения колеблется от нескольких минут до нескольких часов.

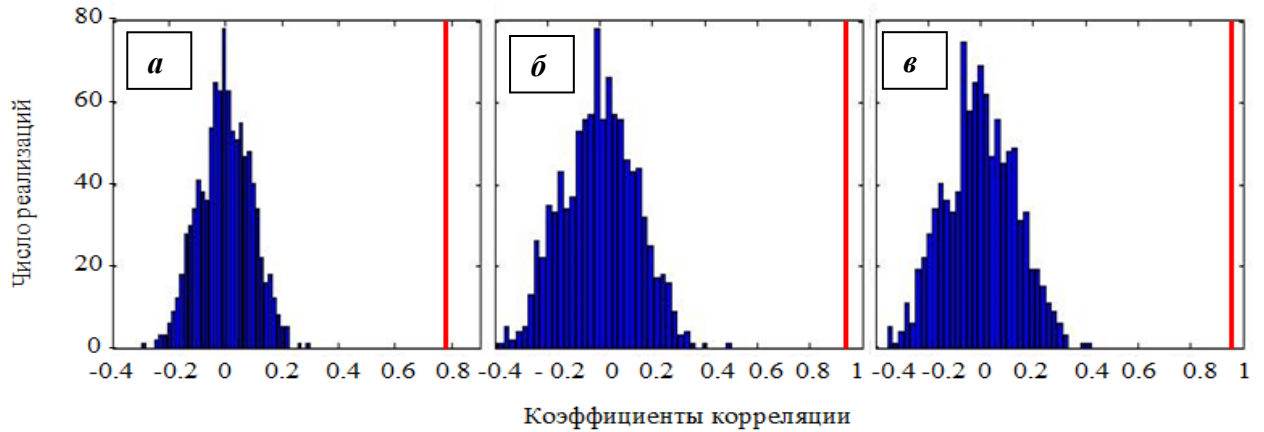


Рисунок 5.10 – Гистограммы, демонстрирующие корреляцию суррогатных рядов данных с использованием разных подходов: а) Кендалла; б) Спирмена; в) Пирсона Красными линиями обозначены значения коэффициентов корреляции для исходных рядов данных

Таблица.5.1. Причинно-следственный анализ связи на основе теста Грейнджера между вариацией скорости сейсмических колебаний v и изменением геомагнитного поля B

	Лаг равен 12 мин (30.10.2008 г.)		Лаг равен 8 мин (26.12.2015 г.)	
	F статистика	P значение	F статистика	P значение
B не является причиной изменения v	63,678	$9 \cdot 10^{-9}$	23,405	$1.7 \cdot 10^{-7}$
v не является причиной изменения B	0,843	0,43777	0,222	0,802

Геомагнитные вариации на приповерхностных участках могут возникать в результате распространения сейсмического сигнала [8, 88-89]. Инструментальные наблюдения, выполненные в зонах тектонических разломов, где все эффекты усиливаются [149, 153], позволяют оценить характер и амплитуду геомагнитных вариаций в результате сейсмического воздействия на твердую среду. При сейсмических воздействиях с амплитудой, превышающей примерно 4 мкм/с, экспериментальные данные, полученные в разных условиях (скальные породы горного массива Мурунтау и

осадочный чехол Центральной части Восточно-Европейской платформы), хорошо группируются вокруг единой зависимости. В частности, получено, что вызываемые даже значительными по амплитуде сейсмическими волнами (мм/с) геомагнитные вариации не превышают 4 нТл и имеют характер квазипериодических колебаний [88-89]. Обобщающая зависимость между амплитудой сейсмического сигнала v и амплитудой геомагнитных вариаций B приведена на рисунке 5.11. Подтверждением несейсмического происхождения рассматриваемых в настоящей работе геомагнитных вариаций служит, то, что, во-первых, характер анализируемых в настоящей работе геомагнитных вариаций существенно отличается от квазигармонических колебаний; во-вторых, при амплитуде вариаций микросейсмического фона меньше 0,3 мкм/с диапазон изменения амплитуды геомагнитных вариаций импульсного типа составляет 10 – ~ 300 нТл, что значительно выше значений амплитуды геомагнитных вариаций, вызванных прохождением сейсмической волны.

Возможность преобразования энергии геомагнитных вариаций импульсного типа в механическую энергию колебаний земной коры определяется известными механизмами, среди которых в качестве основных следует выделить следующие: изменение величины и конфигурации теллурических токов [168]; магнитострикционный эффект [87, 111]; обратный пьезоэлектрический эффект [144, 184]; действие пондеромоторных сил [45]; термическое расширение при нагреве среды [2, 171]; преобразование электромагнитной энергии в колебательную энергию флюидной проводящей жидкости в поровых каналах [163]; гравитационное воздействие [114-115]. Следует особо подчеркнуть, что важную роль в процессе преобразования электромагнитной энергии играет наличие флюидов [72, 146, 165].

Как показывают оценки для условий Геофизической обсерватории "Михнево" [87], величина коэффициента преобразования магнитного поля в деформацию при линейной изотермической магнитострикции поликристаллических кристаллов с произвольной ориентацией кристаллических осей (горные породы) составляет 10^{-9} – 10^{-11} м/А, а для экспериментальных данных составляет 10^{-6} м/А. Следовательно, магнитострикционный эффект нельзя считать основным механизмом преобразования энергии геомагнитных вариаций на поверхности Земли в сейсмические колебания на приповерхностных ее участках.

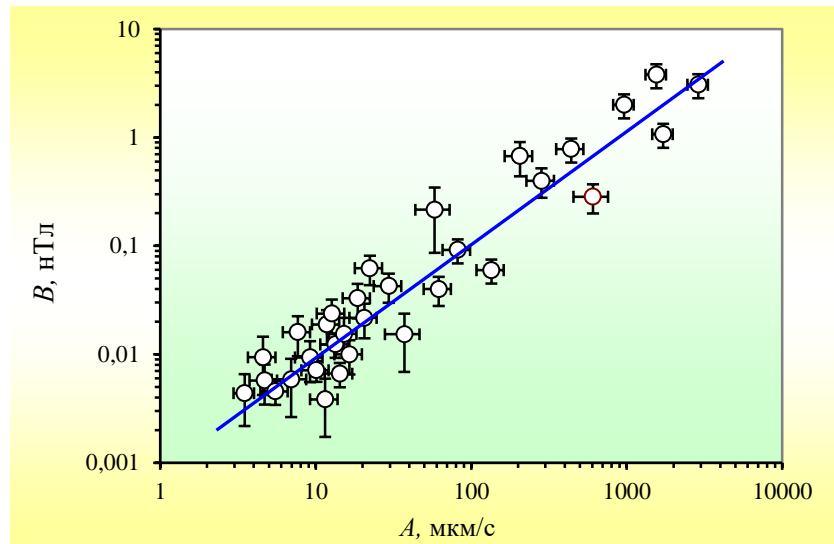


Рисунок 5.11 – Амплитуда вызванных сейсмическим воздействием геомагнитных вариаций (данные работы [88-89])

Для условий сильно обводненного тектонического нарушения Нелидово-Рязанской шовной зоны (НРШЗ) можно предполагать, что 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 НРШЗ. Теллурические токи изменчивы во времени и пространстве: плотность теллурических токов возрастает при магнитных возмущениях и в период магнитных бурь. Токи, наводимые в земной коре при магнитном возмущении, концентрируются в каналах, удельное электрическое сопротивление которых значительно ниже сопротивления несущих пород [77], с проводящей жидкостью в трещиноватой водонасыщенной среде [17]. Это может под воздействием внешнего магнитного поля привести к появлению дополнительных сил [168] и соответственно изменению напряженно-деформированного состояния неоднородной среды, что, в свою очередь, может привести к изменению процессов переупаковки, фрагментации, консолидации и компактизации в горных породах, сопровождаемых трением, подрастанием и закрытием микро- и макротрещин. Это должно привести к изменению электропроводности верхней литосферы. В связи с этим представляет интерес анализ вещественных и мнимых частей магнитного типпера, которые отражают изменение электропроводности земной коры.

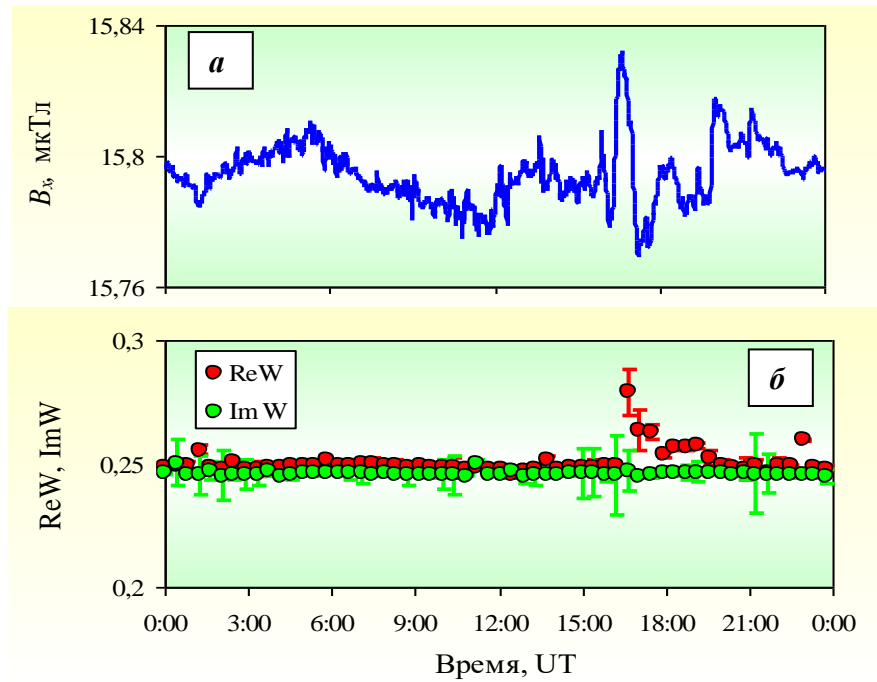


Рисунок 5.12 – Пример геомагнитных вариаций (а) и рассчитанных абсолютных значений вещественной и мнимой частей магнитного типпера (б) с доверительными интервалами (вертикальные линии) (Геофизическая обсерватория "Михнево", 30.10.2008 г.)

Результаты оценки вещественной (ReW) и мнимой (ImW) частей магнитного типпера приведены на рисунке 5.12б. Из рисунка 5.12 видно, что после "пикообразной" геомагнитной вариации в поведении модуля мнимой части магнитного типпера отмечаются "скачкообразные" изменения, что свидетельствует, о том, что при резком изменении в напряженности геомагнитного поля с небольшой задержкой по времени происходит изменение величины наведенных электрических токов. С учетом этого факта "выполаживание" зависимости (5.1) можно объяснить тем, что наведенные в среде электрические токи приближаются к максимуму, который определяется количеством проводящего флюида и его конкретными электрохимическими свойствами.

5.4. Проверка реакции сейсмоприемника на действие магнитного поля

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).

Использовалась методика, предложенная и апробированная в работе [51]. Регистрация микросейсмического фона выполнялась сейсмометрами СМ-3КВ STS-2 при отсутствии и наличии искусственно созданного магнитного поля. В качестве источника слабого магнитного поля (100 – 1000 нТл) использовались соленоиды (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) и кольцевая рамка диаметром 22,5 см, с числом витков 500. Регистрация слабого магнитного поля осуществлялась датчиком из аморфного ферромагнитного материала [19], сильного – с помощью измерительной катушки – наружный диаметр 3,6 см, внутренний диаметр 2 см, высота 1,65, число витков 4500 (медный провод ПЭВ-2 диаметром 0,013 см), сопротивление 500 Ом, чувствительность 100 мкВ/нТл. Схема и последовательность операций при проведении лабораторных экспериментов подробно описана в работе [51]. Катушки и кольцевая рамка по очереди подключались к импульсному источнику. Работа установки заключается в следующем: через выпрямитель от сети 200 В батарея конденсаторов (общая емкость 10 000 мкФ) заряжается до напряжения 300 В. Потом сеть отключается (цепь разрывается специальной кнопкой, обозначенной *K* на рисунке 5.14) и батарея конденсаторов (через тиристор *V*) разряжается на импульсный магнит, создавая в центре рамки или катушки (ИМ) магнитное поле, в которое помещались сейсмоприемники.

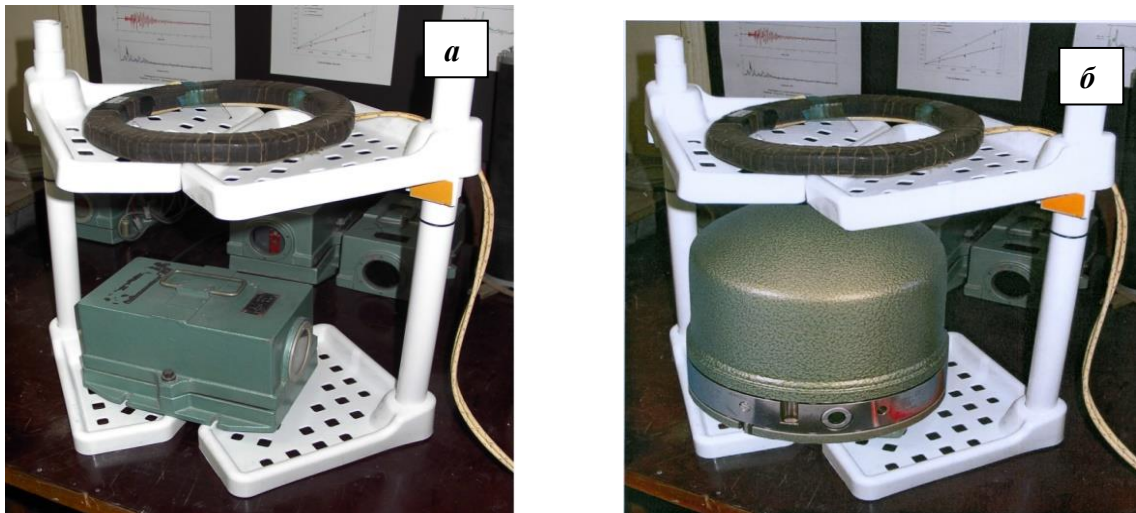


Рисунок 5.13 – Общий вид лабораторного эксперимента по проверке воздействия магнитного поля на сейсморегистраторы СМ-3 КВ (слева) и STS-2 (справа)

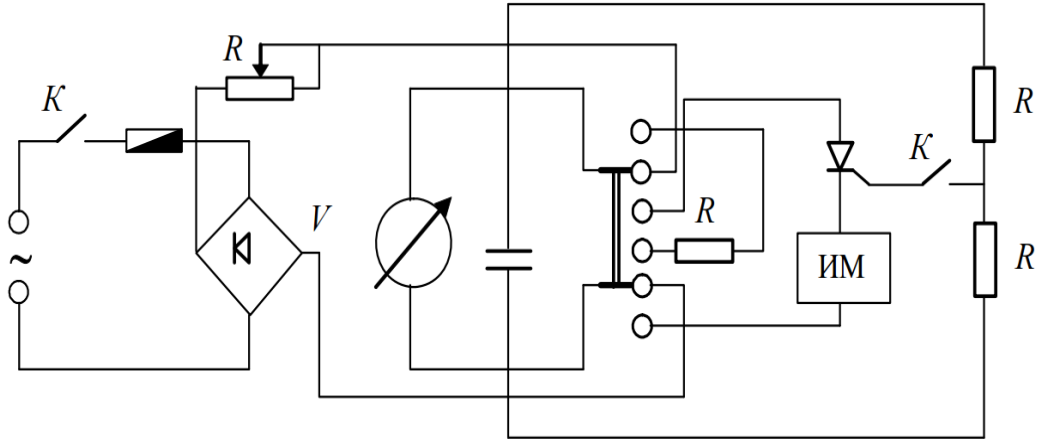


Рисунок 5.14 – Схема установки для получения импульсных магнитных полей [51].

В результате непосредственных измерений установлено, что при магнитных вариациях в широком диапазоне амплитуд вплоть до 5 мкТл, включающем диапазон регистрируемых на обсерватории "Михнево" геомагнитных возмущений рассматриваемого импульсного типа, амплитуда наведенного электрического сигнала не превышала 1 мВ, что в пересчете на сейсмический сигнал составляет 0,01 мкм/с. Это значение заметно меньше нижней границы наведенных микросейсмических возмущений, которые рассматриваются в работе.

Выводы к главе 5:

Полученные в настоящей работе данные демонстрируют принципиальную возможность преобразования энергии геомагнитных вариаций на земной поверхности в энергию сейсмических колебаний в конкретных условиях Геофизической обсерватории "Михнево". Результаты обработки и анализ данных свидетельствуют о том, что во время импульсных вариаций магнитного поля *SSC* и *SI* типа в большинстве случаев наблюдаются повышенные вариации сейсмического фона в частотном диапазоне 0,01 – 0,1 Гц, в отдельных случаях в диапазоне частот 0,001 – 0,1 Гц. Установлена количественная зависимость между амплитудой геомагнитного импульса *V* и амплитудой вызванных вариаций сейсмического фона *v*. Выполненные расчеты свидетельствуют о высокой значимости корреляции между указанными величинами, причем именно изменение геомагнитного поля влечет за собой изменение микросейсмического фона. Время запаздывания отклика вариаций сейсмического фона на геомагнитные возмущения колеблется от нескольких минут до нескольких часов.

Четвертое защищаемое положение: Геомагнитные импульсы и внезапные начала магнитных бурь сопровождаются повышенными вариациями микросейсмического фона в диапазоне частот 0,01 – 0,1 Гц. Установлен линейный рост амплитуды вариаций микросейсмического фона при увеличении амплитуды геомагнитных импульсов в диапазоне до ~ 100 нТл, при дальнейшем увеличении амплитуды геомагнитных импульсов амплитуда вариаций микросейсмического поля растет существенно медленнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведен анализ особенностей геомагнитных вариаций в условиях средних широт, синхронных с ними вариаций режима подземных вод и сейсмических колебаний.

В первой главе диссертации приведен обзор исследований, посвященных анализу геомагнитных вариаций и их связей с изменением характеристик твердой среды. Обзор публикаций показал, что, в целом, многие связанные с этим направлением исследований вопросы недостаточно освещены и среди них можно выделить следующие: 1) оценка достоверности аналитических моделей, в частности, новой версии модели International Geomagnetic Reference Field при описании и прогнозе локальных вариаций магнитного поля; 2) определение частоты и глобальности распространения джерков; 3) процессы, вызывающие периодические вариации магнитного поля Земли; 4) причины расщепления спектральных гармоник в спектре геомагнитных вариаций; 5) особенности суточных вариаций магнитного поля Земли; 6) закономерности изменения геомагнитной активности и ее связь с изменением солнечной активности в разных циклах солнечной активности; 7) закономерности временных вариаций магнитотеллурических передаточных функций и их связь с изменением характеристик твердой среды; 8) оценка связи между геомагнитными вариациями и сейсмотектонической активностью, например, с изменением параметров микросейсмического фона. По итогам обзора сформулирована цель настоящей работы.

Во второй главе описываются используемые данные, а также приводятся краткая характеристика основного пункта наблюдений (Геофизическая обсерватория "Михнево") и описание используемых в работе методов анализа и обработки цифровых рядов. В рамках работы проанализирован большой объем результатов инструментальных наблюдений и использованы проверенные средства измерений, а также современные методы обработки и анализа, что позволяет говорить о достоверности полученных в ходе исследований результатов.

В третьей главе приводятся результаты анализа геомагнитных вариаций, зарегистрированных инструментально в условиях средних широт. Выявлена разница между рассчитанными по модели *IGRF* и экспериментальными значениями магнитного

поля Земли и показано, что она обусловлена, главным образом, литосферной составляющей геомагнитного поля. По данным наблюдений ряда магнитных обсерваторий за вариациями геомагнитного поля в средних широтах идентифицированы джерки 2011 г. и 2014 г. Определены основные периодичности геомагнитных вариаций, особенностями которых является спорадический и фрактальный (в случае, суточных монофрактальный) характер. Выявлены особенности суточных изменений магнитного поля Земли для условий обсерватории "Михнево" и "Бельск". Показано, что в диапазонах периода и полупериода вращения Солнца, а также в суточном и полусуточном диапазонах в спектре геомагнитных вариаций выделяются как гармоники, соответствующие волнам лунно-солнечного прилива, так и обусловленные модуляцией большими периодами.

В четвертой главе рассмотрены временные вариации магнитовариационных параметров (магнитный типпер и магнитный тензор) для условий обсерватории "Михнево" и установлены их периодичности. Определена зависимость между амплитудой магнитного типпера и уровнем подземных вод безнапорного горизонта в открытой скважине.

В пятой главе приводятся результаты анализа синхронных вариаций геомагнитного поля импульсного типа и микросейсмического фона на обсерватории "Михнево". Установлены высокая корреляционная и количественная зависимости между амплитудой геомагнитного импульса и амплитудой сопутствующих вариаций микросейсмического фона, а также время запаздывания возможного отклика вариаций микросейсмического фона на геомагнитные возмущения.

Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом:

- В вековой вариации геомагнитного поля на Геофизических обсерваториях "Михнево", "Борок" и "Бельск" наблюдаются джерки в 2011 г. и 2014 г. Геомагнитные вариации с периодами от 6 часов до 1 года в условиях средних широт имеют скейлинговый характер. Установлен эффект чередования периодов увеличения и деградации интенсивности геомагнитных вариаций (перемежаемость).
- Спектральные составляющие геомагнитных вариаций (в диапазонах 13,5 и 27 суток, околосуточном и полусуточном диапазонах) обусловлены совокупностью двух факторов: наличием гармоник, соответствующих лунно-солнечным приливным волнам, и наличием гармоник, вызванных модуляцией большими периодами. В 24-ом цикле

солнечной активности для геомагнитной активности в условиях Геофизической обсерватории "Михнево" характерен сдвиг на 1 год относительно солнечной активности, причем, максимум геомагнитной активности наблюдается в период весеннего равноденствия.

- Изменение уровня подземных вод безнапорного горизонта сопровождается вариациями магнитного типпера, отмечается линейная зависимость между уровнем подземных вод и магнитудой магнитного типпера.

- Геомагнитные импульсы и внезапные начала магнитных бурь сопровождаются повышенными вариациями микросейсмического фона в диапазоне частот 0,01 – 0,1 Гц. Установлен линейный рост амплитуды вариаций микросейсмического фона при увеличении амплитуды геомагнитных импульсов в диапазоне до ~ 100 нТл, при дальнейшем увеличении амплитуды геомагнитных импульсов амплитуда вариаций микросейсмического поля растет существенно медленнее.

Отмеченные в диссертации особенности геомагнитных вариаций представляют интерес для решения одной из ключевых проблем геофизики, а именно проблемы источников магнитного поля и его вариаций, для совершенствования имеющихся и разработки новых прогностических моделей и моделей динамики геомагнитного поля. Полученные результаты также могут быть востребованы для исследования условий среды обитания, в частности, при оценках возможного влияния геомагнитного поля на организм человека, а также на космические и наземные технологические системы, для прогноза космической погоды. Выделенные по данным Геофизической обсерватории "Михнево" джерки 2011, 2014 гг. могут послужить основой для исследования глобального распространения и временной периодичности джерков. Выявленные особенности суточного хода геомагнитного поля в условиях обсерваторий "Михнево" и "Бельск" могут способствовать дальнейшему развитию теорий и моделей атмосферы Земли, а определенные в работе временные закономерности геомагнитной активности и ее связь с солнечной активностью могут дать основу для дальнейшего исследования солнечно-земных связей и возможности прогноза сильных возмущений магнитного поля и развития солнечной активности.

В настоящей работе показано, что магнитное поле и его вариации являются важной характеристикой процессов взаимодействия полей разной природы, а в целом –

межгеосферных взаимодействий на границе земная кора-атмосфера. Это сделано на примере синхронности геомагнитных вариаций, вариаций микросейсмического фона и изменения режима подземных вод. Установленные в работе количественные зависимости между уровнем подземных вод безнапорного горизонта и магнитным типпером, а также между амплитудой геомагнитных вариаций импульсного типа и амплитудой вариаций микросейсмического фона представляют собой основу для установления механизмов и разработки аналитических и расчетных моделей взаимодействия физических полей и геосфер. Эти связи могут оказаться более сложными в регионах с другими гидрогеологическими условиями, поэтому для получения более полной картины необходимо проведение дальнейших исследований с использованием результатов инструментальных наблюдений, выполненных в других районах. Кроме того, дальнейшее накопление наблюдательной информации позволит уточнить полученные в работе эмпирические закономерности. Следует отметить перспективность использования материалов работы при мониторинге зон влияния тектонических нарушений, динамики карстовых образований, территорий, осложненных горными выработками, территорий АЭС и т.д.

Таким образом, результаты настоящей работы позволяют анализировать изменения геомагнитного поля в широком диапазоне (от суточных до вековых вариаций) в условиях средних широт и предоставляют возможность иллюстрации того факта, что его изменения связаны не только с внешними источниками (солнечная активность, приливное воздействие со стороны системы Луна – Солнце), но также с процессами, протекающими в недрах Земли (изменение водонасыщенности горных пород). Представляет интерес и возможное влияние сильных вариациях магнитного поля Земли на характеристики микросейсмического фона.

Следует отметить, что известные исследования, выполненные в рамках тематики настоящей диссертации, акцентировались, в основном, на отдельных характеристиках геомагнитного поля. В настоящей работе впервые обобщены и систематизированы разрозненные результаты по разным направлениям исследований магнитного поля Земли, которые в совокупности с данными, полученными автором в настоящей работе, демонстрируют динамику геомагнитного поля в условиях средних широт в целом, причем с учетом возможных межгеосферных и солнечно-земных взаимодействий. В этом отношении работу можно рассматривать как новаторскую. Предполагается, что

последующие комплексные исследования вариаций геофизических полей позволят еще точнее представить динамику процессов, протекающих как во внешних оболочках Земли, так и в ее недрах, что, в свою очередь, поспособствует решению фундаментальной задачи геофизики – исследованию межгеосферных взаимодействий и эволюции Земли в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энергетическом воздействии // Физика Земли. – 2006. – № 10. – С. 36-42.
2. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // Физика Земли. – 2005. – № 6. – С. 55-65.
3. Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Санина И.А., Спивак А.А. Комплекс измерений геофизических полей и процессов взаимодействия геосфер обсерватории "Михнево" // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2005. – С. 13-18.
4. Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // Физика Земли. – 2008. – № 6. – С. 77-85.
5. Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике / М.: ГЕОС, 2014. – 360 с.
6. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // Физика Земли. – 2012. – № 2. – С. 14-26.
7. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // Физика Земли. – 2012. – № 3. – С. 3-21.
8. Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора-атмосфера // Физика Земли. – 2006. – № 7. – С. 34-51.
9. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145-1170.
10. Афанасьева В.И., Шейнин А.Д. Некоторые статистические характеристики магнитной активности // Геомагнитная активность и ее прогноз. М.: Наука, 1978. – С. 5-33.
11. Афанасьева В.И. Геоактивность и ее возможные причины // Геомагнетизм и аэрономия. – 1963. – Т. 3. – № 2. – С. 385-386.
12. Бабак В.И., Климкович Т.А., Рокитянский И.И., Терешин А. В. Вариации вектора индукции в Японии // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 1. – С. 153-158.
13. Бабак В.И., Рокитянский И.И., Соколова Е.Ю., Терешин А.В. Годовые, 11-летние и аперiodические вариации вектора индукции на 8 обсерваториях сети Intermagnet // Геофизический журнал. – 2017. – Т. 39. – № 1. – С. 97-110.
14. Бабак В.И., Рокитянский И.И., Терешин А.В. Вариации вектора индукции в Северной Америке // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. – № 6. – С. 183-187.
15. Барляева Т.В., Морозова А.Л., Пудовкин М.И. Влияние космических факторов на развитие землетрясений // Геофизические методы исследования Земли и недр. Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов "Геофизика 99", Санкт-Петербург, 9-12 ноября 1999 г. СПб.: СПбГУ, 2000. – С. 8-19.
16. Барсуков О.М. Два типа 11-летней цикличности сейсмической активности // Известия академии наук СССР. – 1986. – № 6. – С. 76-78.
17. Барсуков О.М. О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1970. – №1. – С. 84-89.
18. Барсуков О.М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. – 1991. – № 12. – С. 93-97.
19. Барышев В.И. Измерение земного магнитного поля магнитометром из аморфного ферромагнитного материала // Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС, 2010. – С. 295-300.

20. Бахмутов В.Г., Седова Ф.И., Мозговая Т.А. Геомагнитная возмущенность и землетрясения в зоне Вранча // Физика Земли. – 2007. – № 11. – С. 30-36.
21. Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П. О взаимосвязях эндогенной активности Земли с солнечной и геомагнитной активностью. // Доклады академии наук. – 2009. – Т. 428. – № 1. – С. 104-108.
22. Бердичевский М.Н. Основы теории магнитотеллурического профилирования // Прикладная геофизика. – 1960. – № 28. – С. 70-91.
23. Бердичевский М.Н. Электроразведка методом магнитотеллурического профилирования / М: Недра, 1968. – 255 с.
24. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики / М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
25. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С., Мерщикова Н.А., Пушкарев П.Ю. Магнитовариационные зондирования: новые возможности // Физика Земли. – 2003. – № 9. – С. 3-30.
26. Бердичевский М.Н., Нгуен Тхань Ван. Магнитовариационный вектор // Физика Земли. – 1991. – № 3. – С. 52-62.
27. Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С., Пигулевский П.И., Свистун В.К., Щербина С.В. Отклик флюидонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Часть 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод // Физика Земли. – 2015. – № 1. – С.73-82.
28. Богданов В.В., Бузевич А.В., Веницкий А.В., Дружин Г.И., Купцов А.В., Поддельский И.Н., Смирнов С.Э., Чернева Н.В., Шевцов Б.М. О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. – С. 259-278.
29. Бондарь Т.Н., Головков В.П., Яковлева С.В. Вековая вариация геомагнитного поля на интервале 1980 – 2000 гг. // Геомагнетизм и аэрономия – 2003. – Т. 43. – № 6. – С. 854-857.
30. Бугаев Е.Г., Спивак А.А., Соловьев С.П. Перспективы использования геофизических полей при выборе площадки и обосновании стабильности геодинамических и сейсмических условий при эксплуатации АС // Ядерная и радиационная безопасность. – 2013. – № 4. – С. 10-17.
31. Бураков К.С., Начасова И.Е. Изменение угловых элементов геомагнитного поля в Европе в последние двадцать четыре столетия // Физика Земли. – 2011. – № 5. – С. 51-57.
32. Валеев С.Г., Фасхутдинова В.А. Кросс-спектральный анализ временных рядов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2006. – Vol. 4. – No. 36. – P. 30-33.
33. Вальчук Т.Е., Фельдштейн Я.И. Индекс aa геомагнитной активности и параметры межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрономия. – 1982. – Т. 22. – № 4. – С. 691-692.
34. Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д. О природе электропроводности консолидированной коры // Физика Земли. – 1996. – № 4. – С. 5-11.
35. Варенцов И.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р., Наливайко К.В. Система передаточных операторов электромагнитного поля для массива синхронных зондирований BEAR // Физика Земли. – 2003. – № 2. – С. 30-61.
36. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов / М.: Высшая школа. 1999. – 576 с.
37. Витязев В.В. Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов: Учебное пособие // СПб.: Изд-тво СПбГУ, 2001. – 48 с.
38. Водяников В.В., Гордиенко Г.И., Нечаев С.А., Соколова О.И., Хомутов С.Ю., Яконец А.Ф. Наведенные токи в линиях электропередач по данным геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46. – № 6. – С. 853-858.

39. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Каган А.И. Гравитационное сглаживание временных рядов // Труды института математики и механики УрО РАН. – Т. 17. – № 2. – 2011. – С. 62-70.
40. Гвишиани А.Д., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., Соловьев А.А., Легостаева О.В. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55. – № 3. – С. 314-322.
41. Головков В.П., Зверева Т.И., Чернова Т.А. Годовая вариация магнитного поля Земли. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44. – № 1. – С. 129-134.
42. Головков В.П., Коломийцева Г.И. Морфология 60-летних вариаций геомагнитного поля в Европе // Геомагнетизм и аэрономия. – 1971. – Т. 11. – № 4. – С. 674-678.
43. Головков В.П., Симонян А.О. О резких изменениях вековых вариаций геомагнитного поля в конце 1970-х годов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31. – № 1. – С. 165-171.
44. Голяндина Н.Э. Метод "Гусеница"-SSA: анализ временных рядов: Учебное пособие / Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.
45. Горберх М.Б., Колосницын Н.И. Пондеромоторное действие электромагнитного поля на среду // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2010. – С. 192-201.
46. Горбунова Э.М. Гидрогеологическое районирование Приокского участка Нелидово-Рязанской шовной зоны // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2005. – С.134-138.
47. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С. Влияние лунно-солнечных приливов на уровень подземных вод по данным ГФО ИДГ РАН "Михнево" // Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС, 2013. – С.174-183.
48. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С. Методические аспекты прецизионного гидрогеологического мониторинга платформенных территорий (на примере геофизической обсерватории ИДГ РАН "Михнево") // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 348-353.
49. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Реакция подземных вод на прохождение сейсмических волн от землетрясений на примере ГФО «Михнево» // Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС, 2015. – С.60-67.
50. Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Исследование динамики вариаций уровня подземных вод под воздействием внешних факторов // Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС., 2009. – С. 232-244.
51. Горюнов Б.Г., Кабыченко Н.В., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Реакция электродинамических сейсмопремников на внешние магнитные поля // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. М.: ИДГ РАН, 2003. – С. 361-364.
52. Грачев А.В. К восстановлению пропусков в экспериментальных данных // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиопизика. Нижний Новгород: ННГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 15-23.
53. Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – № 12. – С. 1257-1276.
54. Гульельми А.В., Зотов О.Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. – 2012. – № 2. – С. 84-87.
55. Гульельми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения // Солнечно-земная физика. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 98-103.
56. Гурарий Г.З., Кудашева И.А., Трубихин В.М., Шипунов С.В. Вековые вариации геомагнитного поля на территории Восточной Грузии 5,5 - 4,5 млн. лет назад // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34. – № 4. – С.137-145.
57. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Сравнительный морфологический анализ суточных ритмов геомагнитной активности и сейсмичности // Геофизические процессы и биосфера. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 55-68.

58. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Харин Е.П. Результаты взаимного корреляционного анализа сейсмичности Гармского полигона и геомагнитных и гелиогеофизических параметров // Геофизические исследования. – 2007. – Т. 7. – С. 14-28.
59. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения / М.: Мир, 1972. – 285 с.
60. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы: учебник для студентов экономических специальностей высших учебных заведений / М.: Финансы и статистика, 2003. – 351 с.
61. Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2016. – № 4. – С. 40-46.
62. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури // Космические исследования. – 2010. – Т. 48. – № 6. – С. 461-474.
63. Жантаев Ж.Ш., Жумабаев Б.Т., Хачикян Е.Я., Тойшиев Н., Кайраткызы Д. Вариации солнечной и глобальной сейсмической активности в 21-24 солнечных циклах. // Известия НАН РК. Серия физическая. – 2015. – № 4. – С. 63-70.
64. Жарков В.Н. Физика земных недр. М.: Наука и образование, – 2012. 384 с.
65. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности / М.: ЛКИ, 2007. – 88 с.
66. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. – 2004. – № 3. – С. 63-75.
67. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. – 2002. – № 4. – С. 3-15.
68. Закс Л. Статистическое оценивание / М.: Статистика, 1976. – 598 с.
69. Закупин А.С., Богомоллов Л.М., Сычев В.Н., Аладьев А.В. и др. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 6. – С. 22-33.
70. Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомоллов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. – 2006. – № 10. – С. 43-50.
71. Зверева Т.И. Динамика главного магнитного поля Земли с 1900 года по наши дни // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. М.: ИЗМИРАН, 2015. – С. 36-45.
72. Зейгарник В.А., Авагимов А.А., Тарасов Н.Т. Можно ли управлять землетрясениями? // Наука в России. – 1999. – № 2. – С. 16-22.
73. Иванов В.В., Бондарь Т.Н. Динамика вековых вариаций в диапазоне до 100 лет и их физическая модель // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55. – № 3. – С. 397-405.
74. Иванченко Г.Н. О геоморфологических признаках неотектонической активности Приокского участка Нелидово-Рязанской шовной зоны // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. Сборник трудов ИДГ РАН. – Москва, 2003. – Кн.1. – С. 119-129
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Взаимосвязь линеаментных форм и геолого-структурного плана территории Московского региона // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы. М.: ГЕОС, 2008. – С. 23-30.
75. Калинин Ю.Д. Вековые геомагнитные вариации / Новосибирск: Наука, 1984. – 160 с.
76. Касинский В.В., Птицына Н.Г., Ляхов Н.Н., Тясто М.И., Виллорези Дж., Юччи Н. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики и телемеханики // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47. – № 5. – С. 714-718.
77. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты / М.: Наука, 2009. – 328 с.
78. Кишкина С.Б. Особенности микросейсмического фона в разных районах России // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. М.: ГЕОС, 2003. – С. 142-152.

79. Козлов В.И., Крымский П.Ф. Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений // Сибирское отделение. Институт космофизических исследований и аэронавтики. Якутск: Якутский научный центр, 1993. – 163 с.
80. Кособоков В.Г. По поводу статьи А. Д. Сытинского "О связи землетрясений с солнечной активностью" // Физика Земли. – 1991. – № 3. – С. 110-112.
81. Кочарян Г.Г., Горбунова Э.М., Копылова Г.Н., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Предварительные результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории ГФО "Михнево" // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы. М.: ГЕОС, – 2008. – С.52-62.
82. Краев А.П. Основы геоэлектрики // Л.: Недра. – 1965. – С. 131-139.
83. Кузнецова В. Г., Максимчук В. Е., Городинский Ю. М., Климкович Т. А. Изучение связи аномальных эффектов в геомагнитном поле с сейсмическим режимом Карпат // Физика Земли. – 2005. – Т. 41. – № 3. – С. 61-67.
84. Кусонский О.А., Бородин П.Б., Бебнев А.С. Вековые вариации геомагнитного поля на Урале по наблюдениям на обсерваториях "Екатеринбург", "Высокая Дубрава", "Арти" // Глубинное строение, геофизика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Девятые научные чтения Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2017. – С. 240-244.
85. Лобычева И.Ю., Седых П.А. Исследование влияния геомагнитной активности на метеорологические процессы в нижней атмосфере // Физика геосфер. Владивосток: Дальнаука. – 2015. – С. 334-338.
86. Локтев Д.Н., Спивак А.А. Барическая составляющая микросейсмического фона // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2013. – С. 236-245.
87. Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А. Численно-феноменологическая модель взаимосвязи магнитного поля и микроколебания земной коры в зоне влияния крупной тектонической структуры. // Динамические процессы в геосферах, Вып. 3. – М.: ГЕОС, 2012. – С. 84-91.
88. Лукишов Б.Г., Спивак А.А., Тер-Семенов А.А. Вариации геомагнитного поля при распространении сейсмических волн через разлом // Доклады академии наук. – 2012. Т. 442. – № 2. – С. 259-262.
89. Лукишов Б.Г., Спивак А.А., Тер-Семенов А.А. Вариации индукции геомагнитного поля при распространении сейсмических волн через разломную зону // Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС, 2011. – С. 196-203.
90. Любушин А.А., Малугин В.А. Статистический анализ отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления // Физика Земли. – 1993. – № 12. – С. 74-80.
91. Любушин А.А., Малугин В.А., Казанцева О.С. Мониторинг приливных вариаций уровня подземных вод в группе водоносных горизонтов // Физика Земли. – 1997. – № 4. С. 52-64.
92. Любушин А.А., Осика В.И., Пчелинцев В.А., Петухова Л.С. Анализ отклика деформаций земной коры на вариации атмосферного давления // Физика Земли. – 1992. – № 2. – С. 81-89.
93. Мандрикова О.В., Богданов В.В., Соловьев И.С. Вейвлет-анализ данных магнитного поля Земли. // Геомагнетизм и аэронавтика. – 2013. – Т. 53. – № 2. – С. 282–288.
94. Мардерфельд Б.Е. Береговой эффект в геомагнитных вариациях / М.: Наука, 1977. – 80 с.
95. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / М.: Мир, 1990. – 586 с.
96. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли. – 2012. – № 5. – С. 64-76.
97. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Магнитовариационные исследования в районе озера Байкал // Физика Земли. – 2006. – № 8. – С. 93-98.
98. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномальные изменения магнитотеллурического импеданса в связи с сильными землетрясениями на Камчатке // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 461. – № 1. – С. 88-92.

99. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Годовые вариации электромагнитного поля Земли и электропроводности геологической среды // Физика Земли. – 2013. – №2. – С. 40-55.
100. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Байкальского рифта // Электромагнитное зондирование Земли. СПб.: Изд-во СПТГУ, 2011. – С. 265-268.
101. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Смирнов С.Э. Результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля на обсерваториях "Магадан" и "Паратунка" // Физика Земли. – 2011. – № 8. – С. 49-61.
102. Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э. О динамике электропроводности геологической среды в зоне субдукции на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2016. – Т. 3. – № 14. – С. 79-84.
103. Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э., Мороз Т.А. Результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля на Камчатке // Физика Земли. – 2006. – № 3. – С. 49-56.
104. Мороз Ю.Ф., Татьков Г.И., Мороз Т.А., Тубанов Ц.А., Предеин П.А. Изменения геомагнитного поля и магнитного типпера в Байкальской рифтовой зоне // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. – № 3. – С.10-23.
105. Начасова И.Е., Бураков К.С. Изменчивость возмущенности напряженности геомагнитного поля в последние семь тысячелетий // Геомагнетизм и аэрономия. – 1997. – Т. 37. – № 6. – С. 120-124.
106. Нечаува Т.С., Шимків Л.М., Горкавко В.М. Карта аномального магнітного поля (ΔT)а України м-бу 1 : 1000000 / Київ, 2002. – 1 с.
107. Новиков В.А., Окунев В.И., Ключкин В.Н. Влияние электрических импульсов на сейсмический цикл // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2017. – С. 171-176.
108. Нусинов А.А., Руднева Н.М., Гинзбург Е.А., Дремухина Л.А. Сезонные вариации статистических распределений индексов геомагнитной активности // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2015. – Т. 55. – № 4. – С. 511-516.
109. Обридко В.И., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2013. – Т. 53. – № 2. – С. 157-166.
110. Обридко В.И., Гольшев С.А., Левитин А.Е. Связь структуры крупномасштабного магнитного поля в циклах солнечной активности со структурой ММП, оказывающей влияние на геомагнитную активность // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44. – № 4. – С. 449-452.
111. Оганесян С.Р., Бондарь Т.Н. Солнечная активность и тектономагнитное поле // Известия НАН РА, Науки о Земле. – 2015. – Vol. 68. – № 2. – С. 71-76.
112. Одинцов С.Д., Иванов-Холодный Г.С., Георгиева К. Солнечная активность и глобальная сейсмичность Земли // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – Т. 71. – № 4. – С. 608-610.
113. Оль А. И. Вековой ход магнитного поля и сейсмичность Земли – Природа. 1949. – № 12. – С. 6-14.
114. Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н. О связи сейсмичности Земли с солнечной активностью по результатам прецезионных деформографических наблюдений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: изд-во Института горного дела СО РАН, 2008. – С. 31–40.
115. Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н. Солнечная активность, колебания внутреннего ядра Земли, общепланетарная сейсмичность // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Бишкек: ИС РАН, 2009. – С. 321-326.
116. Орлов В.П. Вековой ход геомагнитного поля и его необычно резкие изменения // Труды ИЗМИРАН. – 1961. – Вып. 18. – № 28. – С. 77-86.
117. Орлюк М. И. Роменец А. А. Структура и динамика главного магнитного поля Земли на ее поверхности и в ближнем космосе // Odessa astronomical publications. – 2011. – Т. 24. – С. 124-129.
118. Орлюк М.И., Марченко А.В., Роменец А.А. Пространственно-временные изменения геомагнитного поля и сейсмичность // Геофизический журнал. – 2017. – Т. 39. – № 6. – С. 84-105.

119. Папиташвили Н.Е., Ротанова Н.М., Пушкин А.Н. 60-летняя вариация геомагнитного поля на территории Европы. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1980. Т. – 20. – № 4. – С. 711-717.
120. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. – 528 с.
121. Попова О.Г. Жигалин А.Д., Коновалов Ю.Ф. Связь изменения напряженного состояния земной коры с солнечными затмениями и магнитными бурями // Геоэкология. – 2011. – № 3. – С. 55-71.
122. Пушкарев П.Ю., Хмелевской В.К., Бойченко Д.А., Голубцова Н.С., Иванова К.А., Слепых К.С., Хуторской М.Д. Магнитотеллурические исследования геотермальных ресурсов // Геофизика. – 2014. – № 4. – С. 2-7.
123. Рокитянский И. И., Тункер М.К., Танк С.Б., Толак Э., Кайя Т., Литвинчук Н.И., Савченко Т.С., Шевчук А.А. Электромагнитные исследования в районе Дюзджийского землетрясения 12.11.1999, Турция // Геофизический журнал. – 2007. – Т. 29. – № 1. – С. 131-137.
124. Рокитянский И.И. О применении магнитотеллурического метода на анизотропном и неоднородном массивах // Известия академии наук СССР. – 1961. – № 11. – С. 1607-1613.
125. Рокитянский И.И., Бабак В.И., Терешин А.В. Вариации геомагнитных функций отклика в Японии // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37. – № 4. – С. 126-138.
126. Рокитянский И.И., Жао Гуозе, Жан Ян. Магнитотеллурическое зондирование в северо-восточной окраине Тибета // Геофизический журнал. – 2005. – Т. 27. – № 5. – С. 828-836.
127. Рокитянский И.И., Трегубенко В.И., Бабак В.И., Терешин А. В. Вариации компонент вектора индукции и горизонтального тензора перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. по данным японских геомагнитных обсерваторий // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 3. – С. 115-130.
128. Ротанова Н.М., Бондарь Т.Н., Иванов В.В. Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44. – № 2. – С. 276-282.
129. Ротанова Н.М., Бондарь Т.Н., Иванов В.В. Временные изменения в вековых геомагнитных вариациях // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42. – № 5. – С. 708-720.
130. Ротанова Н.М., Папиташвили Н.Е., Пушкин А.Н. Пространственно-временной анализ 60-летних вариаций геомагнитного поля по данным мировой сети обсерваторий // Геомагнетизм и аэрономия. – 1982. – Т. 22. – № 6. – С. 847-851.
131. Ротанова Н.М., Филиппов С.В. Выделение и анализ джерка 1969 г. в геомагнитных вековых вариациях // Геомагнетизм и аэрономия. – 1987. – Т. 27. – № 5. – С. 1001-1005.
132. Руднева Н.М., Гинзбург Е.А., Дремухина Л.А., Нусинов А.А. Оценки сезонных вариаций магнитной активности // Гелиогеофизические исследования. – 2015. – Вып. 13. – Р. 97-105.
133. Русанов А.А., Петрукович А.А. Влияние параметров солнечного ветра на уровень флуктуаций геомагнитного поля // Космические исследования. – 2004. – Т. 42. – № 4. – С. 368-375.
134. Светов Б.С., Карийский С.Д., Кукса Ю.И., Одинцов В.И. Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов // Физика Земли. – 1997. – № 5. – С. 36-46.
135. Семенов В.Ю., Петрищев М.С. Изменчивость среднегодовых импедансов Земли и их пространственных градиентов в Европе // Геофизический журнал. – 2012. – Т. 34. – № 4. – С. 245-252.
136. Серафимова Ю.К. О связи сильных ($M_w \geq 7.5$) землетрясений Камчатки с вариациями чисел Вольфа. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2005. – №6. – С. 116-122.
137. Сергеева Н.А., Шестопапов И.П., Забаринская Л.П., Нисилевич М.В., Згуровский М.З., Болдак А.А., Ефремов К.В. Исследование связи активности Солнца и сейсмической активности земли с помощью вейвлет-преобразования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2014. – № 1. – С. 27-34.
138. Сидорин А.Я. Влияние Солнца на сейсмичность и сейсмический шум // Сейсмические приборы. – 2004. – Вып. 40. – С. 71-80.
139. Симонян А.О., Головков В.П. Пространственные особенности проявления западного дрейфа геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49. – № 6. – С. 843-850.

140. Симонян А.О., Оганян М.В., Хачатрян А.С. Анализ вариаций внешних источников в сопоставлении с данными магнитных наблюдений проводимых на территории Армении // Известия НАН РА. Науки о Земле. – 2011. – № 27. – С. 50-60.
141. Смайли Д.Е., Бражкин В.В., Палмер А. Прямые наблюдения вязкости внешнего ядра Земли и экстраполяция измерений вязкости жидкого железа // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 1. – С. 91-105.
142. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. – 2012. – № 7-8. С. 63-88.
143. Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений. Доклады академии наук. – 2010. – Т. 435. – № 4. – С. 548-553.
144. Соболев Г.А., Демин В.М. Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. – 215 с.
145. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. – 2001. – № 11. – С. 62-72.
146. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В. Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 5. – С. 608-621.
147. Соболев Г.А., Шестопапов И.П., Харин Е.П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. – 1998. – № 7. – С. 85-90.
148. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники / М.: Наука, 2003. – 270 с.
149. Спивак А.А. Особенности геофизических полей в разломных зонах // Физика Земли. – 2010. – № 4. – С. 55-66.
150. Спивак А.А. Приповерхностная геофизика. Учебное пособие / М.: ИДГ РАН – МФТИ, 2010. – 208 с.
151. Спивак А.А., Кишкина С.Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. – 2004. – № 7. – С. 35-49.
152. Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Овчинников В.М. Периодичности микросейсмических процессов // Доклады академии наук СССР. – 2004. – Т. 398. – № 3. – С. 400-403.
153. Спивак А.А. Проявление разломных зон в геофизических полях // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 507-525.
154. Сытинский А.Д. Зависимость сейсмичности Земли от процессов на Солнце, в межпланетной среде и в атмосфере // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. М.: Научный Мир, 1998. – Т. 2. – С. 70-72.
155. Сытинский А.Д. О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли // Доклады академии наук СССР. – 1973. – Т. 208. – № 5. – С. 1078-1081.
156. Сытинский А.Д. О зависимости глобальной и региональной сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла солнечной активности // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 265. – № 6. – С. 1350-1353.
157. Сытинский А.Д. О связи геотектоники с солнечной активностью // Информационный бюллетень САЭ. – 1961. – № 28. – С. 5-10.
158. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 2. – С. 13-30.
159. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. – 1991. – № 3. – С. 110-112.
160. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами / Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 100 с.
161. Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомоллов Л.М. и др. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность в связи с проблемой разрядки

- избыточных тектонических напряжений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2008. – С. 179-189.
162. Сычев В.Н., Богомоллов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС. 2010. – С. 316-326.
163. Сычева Н.А., Богомоллов Л.М., Сычев В.Н. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли. – 2011. – № 3. – С. 55-71.
164. Сычева Н.А., Богомоллов Л.М., Сычев В.Н. Солнечные вспышки, вариации уровня сейсмического шума и сейсмический режим северного Тянь-Шаня. // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2010. – С. 326–335.
165. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 4-5. – С. 152-160.
166. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, – № 10. – С. 1641-1649.
167. Тихонов А.Н., Бердичевский М.Н. Опыт применения магнитотеллурических методов при изучении геологического строения осадочных бассейнов. // Физика Земли.– 1966. – № 2. – С. 34-41.
168. Тренькин А.А. Возможное влияние теллурических токов на сейсмичность земной коры в сейсмоактивных областях // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55. – № 1. – С. 139-144.
169. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
170. Урдуханов Р.И., Хаврошкин О.Б. Сейсмический шум и активизация // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. – С. 175-185.
171. Файнберг Э.Б., Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Васильева Т.А. Генерация тепловых потоков в недрах Земли мировыми геомагнитными бурями // Физика Земли. – 2004. – № 4. – С. 54-62.
172. Черногор Л.Ф. Невозможность существенного влияния теллурических токов на сейсмичность земной коры // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 129-130.
173. Шайторов В.Н., Ефремов М.В., Мариненко В.А., Жолдыбаев А.К., Кушербаева Н.Н., Шульга М.В., Утегенова М.А., Алдабергенова Г.Н. Изучение техногенных изменений геологических сред в геофизических параметрах для мониторинга безопасности объектов атомной отрасли // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – Вып. 2. – С. 92-99.
174. Шалимов С.Л. О механизме геомагнитных джерков // Геофизические исследования. – 2009. – Т. 10. – № 1. – С. 38-43.
175. Шереметьева О.В. Составляющие геомагнитных вариаций с частотами приливных волн // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т.51. – №2. – С. 224-228.
176. Шереметьева О.В., Смирнов С.Э. Приливные компоненты геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47. – № 5. – С. 624-633.
177. Шестопалов И.П., Харин Е.П. Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности // Геофизический журнал. – 2006. – Т. 28. – № 4. – С. 59-70.
178. Широков В.А., Серафимова Ю.К. О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского пояса. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2006. – № 8. – С. 120-133.
179. Эйгенсон М.С., Гневышев М.Н., Оль А.И., Рубашев Б.М. Солнечная активность и ее земные проявления / М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 286 с.
180. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К. Микросейсмические наблюдения / Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. – 64 с.

181. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования / Новосибирск: НГТУ, 2003. – С. 36-44.
182. Яновский Б.М. Земной магнетизм / Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 592 с.
183. Яременко Л. Н. Солнечные геомагнитные вариации / Киев: Наукова думка, 1992. – 138 с.
184. Ярославский М.А., Капустян Н.К. О возможности электросейсмического эффекта // Доклады академии наук СССР. – 1990. – Т. 315. – №2. – 352-354.
185. Abdel-Wahab S., Goned A. Solar cycle dependence of periodic variations in geomagnetic Kp -index // Planetary and Space Science. – 1974. – Vol. 22. – No. 4. – P. 537-544.
186. Aboud A., Saud R., Asch T., Aldamegh K., Mogren S. Water exploration using Magnetotelluric and gravity data analysis // Journal of Astronomy and Geophysics. – 2014 – Vol. 3. – No. 2 – P. 184-191.
187. Adam A., Szarka L., Verö J., Wallner A., Gutdeutsch R. Magnetotellurics (MT) in mountains – noise, topographic and crustal inhomogeneity effects // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1986. – Vol. 42. – P. 165-177.
188. Aizawa, K., Kanda W., Ogawa Y., Iguchi M., Yokoo A., Yakiwara H., Sugano T. Temporal changes in electrical resistivity at Sakurajima Volcano from continuous magnetotelluric observations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2011. – Vol. – 199. – P. 165-175.
189. Akasofu S.-I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Science Reviews. – 1981. – Vol. 28. – P. 121-190.
190. Akimov L.A., Dyatel N.P. Influence of the Moon on the Earth's magnetosphere at various phases of a solar activity cycle // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2012. – Vol. 28. – P. 39-42.
191. Alexandrescu M., Courtillot V., Le Mouel J.L. High-resolution secular variation of the geomagnetic field in Western Europe over the last 4 centuries: Comparison and integration of historical data from Paris and London // Journal of Geophysical Research. – 1997. – Vol. 102. – P. 20245-20258.
192. Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouel J., Saracco G. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks // Journal of Geophysical Research. – 1996. – Vol. 101. – P. 21975-21994.
193. Alexandrov T. A method of trend extraction using singular spectrum analysis // Revstat. – Vol. 7. – No. 1. – P. 1-22.
194. Alldredge L.R. A discussion of impulses and jerks in the geomagnetic field // Journal of Geophysical Research. – 1984. – Vol. 89. – P. 4403-4412.
195. Alldredge L.R. Geomagnetic variations with periods from 13 to 30 years // Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. – 1977. – Vol. 29. – P. 123-135.
196. Amestoy P.R., Guermouche A., L'Excellent J.-Y., Pralet S. Hybrid scheduling for the parallel solution of linear systems // Parallel Computing. – 2006. – Vol. 32. – P. 136-156.
197. Anad F., Amory-Mazaudier C., Hamoudi M., Bourouis S., Abtout A., Yizengaw E. (2016) Sq solar variation at Medea Observatory (Algeria), from 2008 to 2011 // Advances in Space Research. – Vol. 58. – No. 9. – P. 1682-1695.
198. Anagnostopoulos G., Papandreou A. Space conditions during a month of a sequence of six $M > 6.8$ earthquakes ending with the tsunami of 26 December 2004. // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2012. – Vol. 12. – P. 1551-1559.
199. Arora B.R., Rao D.R.K. Modulation of geomagnetic lunar daily variation in H at Alibag with lunar distance // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1975. – Vol. 43. – P. 627-633.
200. Arora B.R., Rao D.R.K., Sastri N.S. Geomagnetic solar and lunar daily variations at Alibag, India // Pure and Applied Geophysics. – 1984. – Vol. 122. – P. 89-109.
201. Bai D.H., Meju A.M., Liao Z. Magnetotelluric images of deep crustal structure of the Rehai geothermal field near Tengchong, southern China // Geophysical Journal International. – 2001. – Vol. 147. – P. 677-687.
202. Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C., Gosling J.T. Solar cycle evolution of high-speed solar wind streams // Astrophysical Journal. – 1976. – Vol. 207. – No. 3. – P. 977-980.

203. Banks R.J. Geomagnetic variations and the electrical conductivity of the upper mantle // *Geophysical Journal International*. – 1969. – Vol. 17. – No. 5. – P. 457-487.
204. Banks R.J. The effects of non-stationary noise on electromagnetic response estimates // *Geophysical Journal International*. – 1998. – Vol. 135. – P. 553-563.
205. Bartels J. Discussion of time variations of geomagnetic activity indices Kp and Ap 1932-1961 // *Annales Geophysicae*. – 1963. – Vol. 19. – P. 1-20.
206. Bartels J. Potsdamer erdmagnetische Kennziffern // *Zeitschrift für Geophysik*. – 1938. – Vol. 14. – No. 78. – P. 699-718.
207. Bartels J. Terrestrial magnetic activity and its relations to solar phenomena // *Journal of Geophysical Research*. – 1932. – Vol. 37. – No. 1. – P. 1-52.
208. Bartels J. Twenty-seven day recurrences in terrestrial-magnetic and solar activity, 1923–1933 // *Journal of Geophysical Research*. – 1934. – Vol. 39. – No. 1. – P. 201-202.
209. Bartels J., Heck N.H., Johnson H.F. The three-hour-range index measuring geomagnetic activity // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. – 1939. – Vol. 44. – P. 411-454.
210. Bartels J., Johnston H.F. Geomagnetic tides in horizontal intensity at Huancayo // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. – 1940. – Vol. 45. – P. 269-308.
211. Bauer L.A. Magnetograph records of earthquakes with special reference to the San Francisco earthquake of April 18, 1906 // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. – 1906. – Vol. 11. – No. 3. – P. 135–144.
212. Beamish D., Clark T.D.G., Clarke E., Thomson A.W.P. Geomagnetically induced currents in the UK: geomagnetic variations and surface electric fields // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2002. – Vol. 64. – P. 1779-1792.
213. Bedrosian P.A., Unsworth M.J., Egbert G.D., Thurber C.H. Geophysical images of the creeping San Andreas Fault: implications for the role of crustal fluids in the earthquake process // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 385. – P. 137-158.
214. Bell B., Defouw R.J. Concerning a lunar modulation of geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1964. – Vol. 69. – No. 15. – P. 3169-3174.
215. Benkova N.P. The 27-day recurrence-tendency of magnetic storms // *Journal of Geophysical Research*. – 1942. – Vol. 47. – No. 2. – P. 147-153.
216. Berthelier A. J. Influence of the polarity of the interplanetary magnetic field on the annual and diurnal variation of geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – Vol. 81. – No. 25. – P. 4546-4552.
217. Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I. Chilean earthquakes: Aquifer responses at the Russian platform // *Pure and Applied Geophysics*. – 2016. – Vol. 173. – No. 4. – P. 1039-1050.
218. Bigg E.K. The influence of the moon on geomagnetic disturbances // *Journal of Geophysical Research*. – 1963. – Vol. 68. – No. 25. – P. 1409-1413.
219. Bilitza D., Reinisch B.W. International reference ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Advances in Space Research*. – 2008. – Vol. 42. – No. 4. – P. 599-609.
220. Black D.I. Lunar and solar magnetic variations at Abinger: their detection and estimation by spectral analysis via Fourier transformation // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 1970. – Vol. A268. – P. 233-263.
221. Bloxham J., Dumberry M., Zatman S. The origin of geomagnetic jerks // *Nature*. – 2002. – Vol. 420. – P. 65-68.
222. Bloxham J., Gubbins D. The secular variation of Earth's magnetic field // *Nature*. – 1985. – Vol. 317. – P. 777–781.
223. Bobova V.P., Stepanian N.N. Variations of the magnetic field of the Sun and the Earth in 7 – 50 day periods // *Solar Physics*. – 1994. – Vol. 152. P. 291-296.
224. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N. and Zakupin A.S. Acoustic emissions response of rocks to electric power action as seismic – electric effect manifestation // *Annals of Geophysics*. – 2004. – Vol. 47. – No 1. – P. 65-72.
225. Bolduc L. GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2002. – Vol. 64. – No. 16. – P. 1793-1802.

226. Bolzan M.J.A., Rosa R.R., Sahai Y. Multifractal analysis of low-latitude geomagnetic fluctuations // *Annales Geophysicae*. – 2009. – Vol. 27. – P. 569-576.
227. Borello-Filisetti O., Mussino V., Parisi M., Storini M. Long-term variations in the geomagnetic activity level. I. A connection with solar activity // *Annales Geophysicae*. – 1992. – Vol. 10. – P. 668-675.
228. Bostick Jr. F.S., Smith, H.V. Investigation of large-scale inhomogeneities in the earth by the magnetotelluric method. // *Proceedings of the IRE* – 1962. – Vol. 50. – P. 2339-2346.
229. Boteler D.H., Bui-Van Q., Lemay J. Directional sensitivity to geomagnetically induced currents of the Hydro-Quebec 735 kV power system // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1994. – Vol. 9. – No. 4. – P. 1963-1971.
230. Broun J.A. On the variations of the daily mean horizontal force of the Earth's magnetism produced by the sun's rotation and the moon's synodical and tropical revolutions // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1876. – Vol. 166. – P. 387-404.
231. Brown W.J, Mound J.E., Livermore P.W. Jerks abound: an analysis of geomagnetic observatory data between 1957 and 2008. // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2013. – Vol. 223. – P. 62-76.
232. Burbey T. J., Hisz D., Murdoch L.C. , Zhang M. Quantifying fractured crystalline-rock properties using well tests, earth tides and barometric effects // *Journal of Hydrology*. – 2012. – Vol. 414-415. – P.317-328.
233. Butcher E.C., Brown G. M. Abnormal quiet days and the effect of the interplanetary magnetic field on the apparent position of the *Sq* focus // *Geophysical Journal International*. – 1980. –Vol. 63. – P. 783-789.
234. Butcher E.C., Brown G.M. The variability of *Sq(H)* normal quiet days // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1981. – Vol. 64. P. 527-537.
235. Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting // *Geophysics*. – 1953. – Vol. 8. – P. 605-635.
236. Cai J.H., Tang J.T., Hua X.R. An analysis method for magnetotelluric data based on the Hilbert–Huang Transform // *Exploration Geophysics*. – 2009. – Vol. 40. – P. 197-205.
237. Campbell W.H. An introduction to quiet daily geomagnetic fields // *Pure and Applied Geophysics*. – 1989. – Vol. 131. – P. 315-331.
238. Campbell W.H. Annual and semiannual variations of the geomagnetic field at equatorial locations // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1981. – Vol. 43. – P. 607-616.
239. Campbell W.H. Natural magnetic disturbance fields, not precursors, preceding the Loma Prieta earthquake // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – Vol. 114. – A05307. doi:10. 1029/–2008JA013932.
240. Campbell W.H. Observation of electric currents in the Alaska oil pipeline resulting from auroral electrojet current sources // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1980. – Vol. 61. – P. 437-449.
241. Campbell W.H., Barton C.E., Chamalaun F.H., Welsh W. Quiet-day ionospheric currents and their application to upper mantle conductivity in Australia. // *Earth Planets Space*. – 1998. – Vol. 50. – P. 347-360.
242. Campbell W.H., Matsushita S. *Sq* currents: A comparison of quiet and active year behavior // *Journal of Geophysical Research*. – 1982. – Vol. 87. – No. A7. – P. 5305-5308.
243. Campbell W.H., Schiffmacher E.R. Upper mantle electrical conductivity for seven subcontinental regions of the Earth // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1988. – Vol. 40. – P. 1387-1406.
244. Campbell W.H., Schiffmacher E.R., Arora B.R. Quiet geomagnetic field representation for all days and latitudes // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1992. – Vol. 44. – P. 459-480.
245. Campos-Enriquez J.O., Hernandezquintero E., Nolasco-Chavez H., Orozco Torres A., Canon-Amaro C., Alvarezgarcía G., Urrutia-Fucugauchi J. A preliminary assessment of the *IGRF-1995* for Mexico // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1994. –Vol. 82. – P. 105-111.

246. Cataldi G., Cataldi D., Straser V. Solar activity correlated to the M7.0 Japan earthquake occurred on April 15, 2016 // *New Concepts in Global Tectonics Journal*. – 2016. – Vol. 4. – No. 2. – P. 279-285.
247. Celik C, The lunar daily geomagnetic variation and its dependence on sunspot number // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 2014. – Vol. 119. P. 153-161.
248. Celik C. The solar daily geomagnetic variation and its dependence on sunspot number // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 2013. – Vol. 104. P. 75-86.
249. Celik C., Tuncer M.K., Tolak-Ciftci E., Zobu M., Oshiman N., Tank S.B. Solar and lunar geomagnetic variations in thenorthwestern part of Turkey // *Geophysical Journal International*. – 2012. – Vol. 189. – P. 391-399.
250. Chang H.-Y. Frequency-modulated solar rotational periodicity of geomagnetic indices // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2014. – Vol. 66. – No. 5. – P. 86-1-86-6.
251. Chant I.J., Hastie L.M. Time-frequency analysis of magnetotelluric data // *Geophysical Journal International*. – 1992. – Vol. 111. – P. 399-413.
252. Chapman S. The lunar tide in the atmosphere // *Nature*. – 1919. – Vol. 103. – P. 185-187.
253. Chapman S. The moon's influence on the earth's magnetism // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. – 1914. – Vol. 19. – P. 39-44.
254. Chapman S., Bartels J. *Geomagnetism* / London: Oxford University Press, 1940. – 601 p.
255. Chatfield C. *The analysis of time series* // Boca Raton, Florida: Chapman and Hall, 2004. – 352 p.
256. Chave A.D. Comment on "Robust error on magnetotelluric impedance estimates" by P. Wawrzyniak, P. Sailhac and G. Marquis // *Geophysical Prospecting*. – 2016. – Vol. 64. – P. 247–249.
257. Chave A.D., Jones A. *The magnetotelluric method: theory and practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 552 p.
258. Chave A.D., Jones A.G. Electric and magnetic field galvanic distortion decomposition of BC87 data // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1997. – Vol. 49. – P. 767-789.
259. Chave A.D., Thomson D.J. A bounded influence regression estimator based on the statistics of the hat matrix // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 2003. – Vol. 52. – P. 307-322.
260. Chave A.D., Thomson D.J. Bounded influence magnetotelluric response function estimation // *Geophysical Journal International*. – 2004. – Vol. 157. – P. 988-1006.
261. Chave A.D., Thomson D.J. Some comments on magnetotelluric response function estimation // *Journal of Geophysical Research*. – 1989. – Vol. 94. – P. 14215-14225.
262. Chave A.D., Thomson D.J., Ander M.E. On the robust estimation of power spectra, coherences and transfer functions // *Journal of Geophysical Research*. – 1987. – Vol. 92. – P. 633-648.
263. Chelidze T., Gvelesiani A., Varamashvili N., Devidze M., Chikhladze V., Chelidze Z., Elashvili M. Electromagnetic initiation of slip: laboratory model // *Acta Geophysica Polonica*. 2004. – Vol. 52. – No. 1. – P. 49-62.
264. Chelidze T., Lursmanashvili O. Electromagnetic and mechanical control of slip: laboratory experiments with slider system // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2003. – Vol. 10. – No. 6. – P. 557-564.
265. Chelidze T., Varamashvili N., Devidze M., Tchelidze Z., Chikhladze V., Matcharashvili T. Laboratory study of electromagnetic initiation of slip // *Annals of Geophysics*. – 2002. – Vol. 45. – No. 5. – P. 587-598.
266. Chen K.-J., Chiu B., Lin C.-H. A search for a correlation between time change in transfer functions and seismic energy release in northern Taiwan // *Earth, Planets and Space*. – 2006. – Vol. 58. – P. 981-991.
267. Chernosky E. J. Double sunspot-cycle variation in terrestrial magnetic activity, 1884-1963 // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – No. 3 – P. 965-974.
268. Choi D.R., Maslov L. Earthquakes and solar activity cycles. // *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*. – 2010. – No. 57. – P. 85-97.

269. Chowdhury P., Choudhary D.P., Gosain S., Moon J. Short-term periodicities in interplanetary, geomagnetic and solar phenomena during solar cycle 24 // *Astrophysics and Space Science*. – 2015. – Vol. 356. – No.1. doi:10.1007/s10509-014-2188-0.
270. Chree C., Stagg J.M. Recurrence phenomena in terrestrial magnetism // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1927. – Vol. 227. – P. 21-62.
271. Chulliat A., Alken P., Maus S. Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's Core // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Vol. 42. – No. 19. – P. 3321-3329.
272. Chulliat A., Blanter E., Le Mouel J.-L., Shinirman M. On the seasonal asymmetry of the diurnal and semidiurnal geomagnetic variations // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110. – A05301. doi:10.1029/2004JA010551.
273. Chulliat A., Maus S. Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010 // *Journal of Geophysical Research*. – 2014. – Vol. 119. – No. 3. – P. 1531-1543.
274. Chulliat A., Thebault E., Hulot G. Core field acceleration pulse as a common cause of the 2003 and 2007 geomagnetic jerks // *Geophysical Research Letters*. – 2010. – Vol. 119. – No. 3. – P. 1531-1543.
275. Cliver E.W., Boriakoff V., Bounar K.H. The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1996. – Vol. 101. – No. A12. – P. 27091-27109.
276. Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105. – P. 2413–2424.
277. Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of *aa* data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2002. – Vol. 64. P. 47-53.
278. Cliver E.W., Swalgaard L., Ling A.G. Origins of the semiannual variation of geomagnetic activity in 1954 and 1996 // *Annales Geophysicae*. – 2004. – Vol. 22. – P. 93-100.
279. Cnossen I., Richmond A.D. Changes in the Earth's magnetic field over the past century: Effects on the ionosphere-thermosphere system and solar quiet (*Sq*) magnetic variation // *Journal of Geophysical Research*. – 2013. – Vol. 118. – P. 849-858.
280. Coleman P.J., Smith E.J. An interpretation of the subsidiary peaks at periods near 27 days in the power spectra of C_i and K_p // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – P. 4685-4686.
281. Consolini G., De Marco R., De Michelis P. Intermittency and multifractional Brownian character of geomagnetic time series // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2013. – Vol. 20. – P. 455–462.
282. Constable C., Johnson C. A paleomagnetic power spectrum // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2005. – Vol. 153. – P. 61-73.
283. Cortie A.L. Sunspots and terrestrial magnetic phenomena, 1898-1911: The cause of the annual variation in magnetic disturbances. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1912. – Vol. 73. – P. 52-60.
284. Courtillot V., Ducruix J., Le Mouel J.-L. Sur une acceleration recente de la variation seculaire du champ magnetique terrestre // *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Seances De l'Academie Des Sciences. Serie D: Sciences Naturelles*. – 1978. – Vol. 287. – P. 1095-1098.
285. Courtillot V., Gallet Y., Le Mouel J.-L., Fluteau F., Genevey A. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2007. – Vol. 253. – No. 3-4. – P. 328-339.
286. Courtillot V., Le Mouel J.L. Time variations of the Earth's magnetic field: From daily to secular // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1988. – Vol. 16. – P. 389-476.
287. Courtillot V., Le Mouel J.L., Mayaud P. N. Maximum entropy spectral analysis of the geomagnetic activity index as over a 107-year interval // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82. – P. 2641-2649.
288. Cox G.A., Livermore P.W., Mound J.E. The observational signature of modelled torsional waves and comparison to geomagnetic jerks // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2016. – Vol. 255. – 50-65.

289. Crooker N.U., Feynman J., Gosling J.T. On the high correlation between long-term averages of solar wind speed and geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82. – P. 1933-1937.
290. Cueto M., McKnight D., Herraiz M. Daily geomagnetic variations on the Iberian Peninsula // *Geophysical Journal International*. – 2003. – Vol. 152. – P. 113-123.
291. Currie R.G. A note on the geomagnetic spectrum // *Journal of Geophysical Research*. – 1972. – Vol. 77. – P. 6893-6895.
292. Currie R.G. Geomagnetic line spectra 2 to 70 years // *Astrophysics and Space Science*. – 1973. – Vol. 21. – P. 425-438.
293. Currie R.G. The geomagnetic spectrum 40 days to 5.5 years. // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – P. 4579-4598.
294. Currie R.G. Long period magnetic activity – 2 to 100 years // *Astrophysics and Space Science*. – 1976. – Vol. 39. – P. 251-254.
295. Cutillo P. A., Bredehoeft J.D. Estimating aquifer properties from the water level response to Earth tides // *Ground Water*. – 2011. – Vol.49. – No. 4. – P. 600-610.
296. Daubechies I. Ten lectures on wavelets / Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. – 357 p.
297. De Mayer F. A modulation model for the solar and lunar daily geomagnetic variations // *Earth Planets Space*. – 2003. – Vol. 55. – P. 405-418.
298. De Michelis P., Cafaralla L., Meloni A. A global analysis of the 1991 geomagnetic jerk // *Geophysical Journal International*. – 2000. – Vol. 143. – P. 545-556.
299. De Michelis P., Consolini G. On the local Hurst exponent of geomagnetic field fluctuations: Spatial distribution for different geomagnetic activity levels // *Journal of Geophysical Research*. – 2015. – Vol. 120. – No. 4. – P. 2691-2701.
300. De Santis A., Qamili E., Wu L. Toward a possible next geomagnetic transition? // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2013. – Vol. 13. – P. 3395-3403.
301. Delouis H., Mayaud P.N. Spectral analysis of the geomagnetic activity index AA over a 103-year interval. // *Journal of Geophysical Research*. – 1975. – Vol. 80. – P. 4681-4688.
302. Demetrescu C., Dobrica V. Signature of Hale and Gleissberg solar cycles in the geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113. – A02103. doi: 10.1029/2007JA012570.
303. Desjardins E., Dormy E., Grenier E. Instability of Ekman-Hartmann boundary layers, with application to the fluid flow near the core-mantle boundary // *Physics of the Earth Planetary Interiors*. – 2001. – Vol. 123. – P. 15-26.
304. Du Z.L. The correlation between solar and geomagnetic activity – Part 2: long-term trends // *Annales Geophysicae*. – 2011. – Vol. 29. – P. 1341-1348.
305. Duka B., De Santis A., Manda M., Isac A., Qamili E. Geomagnetic jerks characterization via spectral analysis // *Solid Earth*. – 2012. – Vol. 3. – P. 131-148.
306. Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq -variations // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2003. – Vol. 3. – P. 171-177.
307. Echer E., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Prestes A., Vieira L.E.A., dal Lago A., Guarnieri F.L., Schuch N.J. Long-term correlation between solar and geomagnetic activity // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2004. – Vol. 66. – P. 1019-1025.
308. Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Statistical studies of geomagnetic storms with peak $D_{st} \leq -50$ nT from 1957 to 2008 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2011. – Vol. 73. – P. 1454-1459.
309. Eckhardt D.H. Geomagnetic induction in a concentrically stratified earth // *Journal of Geophysical Research*. – 1963. – Vol. 68. – P. 6273-6278.
310. Edwards R.N., Kurtz R.D. 27-day recurrence phenomena in the geomagnetic field at Alert // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1971. – Vol. 8. – No. 11. – P. 1382-1387.
311. Egbert G., Livelybrooks D.W. Single station magnetotelluric impedance estimation: Coherence weighting and the regression M -estimate // *Geophysics*. – 1996. – Vol. 61. – P. 964-970.

312. Egbert G.D. Processing and interpretation of the electromagnetic induction array data // *Surveys in Geophysics*. – 2002. – Vol. 23. – P. 207-249.
313. Egbert G.D. Robust multiple-station magnetotelluric data processing // *Geophysical Journal International*. – 1997. – Vol. 130. – P.475- 496.
314. Egbert G.D., Booker J.R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1986. – Vol. 87. – P. 173-194.
315. Egbert G.D., Booker J.R., Schultz A. Very long period magnetotellurics at Tucson observatory: Estimation of impedances // *Journal of Geophysical Research*. – 1992. – Vol. 97. – P. 15113-15128.
316. Egbert G.D., Eisel M., Boyd O.S., Morrison H.F. DC trains and Pc3s: Source effects in mid-latitude geomagnetic transfer functions // *Geophysical Research Letters*. – 2000. – Vol. 27. – P. 25-28.
317. Eisel M., Egbert G.D. On the stability of magnetotelluric transfer function estimates and the reliability of their variances // *Geophysical Journal International*. – 2001. – Vol. 144. – P. 65–82.
318. Elsner J., Tsonis A. Singular spectrum analysis. A new tool in time series analysis / New York: Plenum Press, 1996. – 163 p.
319. Ernst T., Brasse H., Cerv V, Hoffmann N., Jankowski J., Jozwiak W., Kreuzmann A., Neska A., Palshin N., Pedersen L. B., Smirnov M., Sokolova E., Varentsov Iv.M. EM images of the deep structure of the Trans-European Suture Zone beneath Polish Pomerania // *Geophysical Research Letter*. – 2008. – Vol. 35. – L15307. doi:10.1029/2008GL034610.
320. Ernst T., Sokolova E.Yu., Varentsov I.M., Golubev N.G. Comparison of two techniques for magnetotelluric data processing using synthetic data sets // *Acta Geophysica Polonica*. – 2001. – Vol. XLIX. – No. 2. – P. 213-243.
321. Eroshenko E.A., Belov A.V., Boteler D., Gaidash S.P., Lobkov S.L., Pirjola R., Trichtchenko L. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // *Advances in Space Research*. – 2010. – Vol. 46. – No. 9. – P. 1102-1110.
322. Escalas M., Queralt P., Ledo J., Marcuello A. Polarisation analysis of magnetotelluric time series using a wavelet-based scheme: a method for detection and characterisation of cultural noise sources // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2013. – Vol. 218. – P. 31-50.
323. Falayi E.O, Beloff N. Asymmetry in seasonal variation of geomagnetic activity // *Canadian journal of pure and applied sciences*. – 2009. – Vol. 3. – No. 2. – P. 813-820.
324. Fang T.-W., Akmaev R., Fuller-Rowell T., Wu F., Maruyama N., Millward G. Longitudinal and day-to-day variability in the ionosphere from lower atmosphere tidal forcing // *Geophysical Research Lette*. – 2013. –Vol. 40. – P. 2523–2528.
325. Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1992. – Vol. 24. – P. 395-457.
326. Farquharson C.G., Craven J.A. Three-dimensional inversion of magnetotelluric data for mineral exploration: an example from the McArthur River uranium deposit, Saskatchewan, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2008. – Vol. 68. – P. 450-458.
327. Fearn D.R., Loper D.E. Compositional convection and stratification of Earth's core // *Nature*. – 1981. – Vol. 289. – P. 393-394.
328. Feng Y., Holme R., Cox G.A., Jiang Y. The geomagnetic jerk of 2003.5-characterisation with regional observatory secular variation data // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2018. – Vol. 278. – P. 47-58.
329. Fenimore E.E., Asbridge J.R., Bame S.J., Feldman W.C., Gosling J.T. The power spectrum of the solar wind speed for periods greater than 10 days // *Journal of Geophysical Research*. – 1978. – Vol. 83. – No. A9. – P. 4353-4357.
330. Feynman J. Geomagnetic and solar wind cycles, 1900 – 1975 // *Journal of Geophysical Research*. – 1983. – Vol. 88. – P. 8139-8140.
331. Feynman J. Geomagnetic and solar wind cycles, 1900 – 1975 // *Journal of Geophysical Research*. – 1982. – Vol. 87. – P. 6153-6162.
332. Finlay C.C., Olsen N., Tøffner-Clausen L. DTU candidate field models for IGRF-12 and the CHAOS-5 geomagnetic field model // *Earth Planets Space*. – 2015. – Vol. 67. doi:10.1186/s40623-015-0274-3.

333. Finlay C.C., Dumberry M., Chulliat A., Pais M.A. Short timescale core dynamics: Theory and observations // *Space Science Reviews*. – 2010. – Vol. 155. P. 177-218.
334. Forbes J.M., Zhang X., Bruinsma S., Oberheide J. Lunar semidiurnal tide in the thermosphere under solar minimum conditions // *Journal of Geophysical Research*. – 2013. – Vol. 118. – P. 1788-1801.
335. Foufoula-Georgiou E., Kumar P. *Wavelets in geophysics* / New York: Academic Press, 1995. – 373 p.
336. Fraser-Smith A.C. Spectrum of the geomagnetic activity index A_p // *Journal of Geophysical Research*. – 1972. – Vol. 77. – P. 4209-4220.
337. Fujiwara S., Toh H. Geomagnetic transfer functions in Japan obtained by first order geomagnetic survey // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1996. – Vol. 48. – P. 1071-1101.
338. Gamble T.D., Goubau W.M., Clarke J. Magnetotellurics with a remote reference // *Geophysics*. – 1979. – Vol. 44. – P. 53-68.
339. Garcia X., Chave A.D., Jones A.G. Robust processing of magnetotelluric data from the auroral zone // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1997. – Vol. 49. – P. 1451-1468.
340. Garcia X., Jones A.G. Atmospheric sources for audiomagnetotellurics (AMT) sounding // *Geophysics*. – 2002. – Vol. 67. – No. 2. – P. 448-458.
341. Garcia X., Jones A.G. Robust processing of magnetotelluric data in the AMT dead band using the continuous wavelet transform // *Geophysics*. – 2008. – Vol. 73. – No. 6. – P. 223-234.
342. Garrett H.B., Dessler A.J., Hill T.W. Influence of solar wind variability on geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1974. – Vol. 79. – P. 4603-4610.
343. Gasperini F., Forbes J.M. Lunar-solar interactions in the equatorial electrojet // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – Vol. 41. – No. 9. – P. 3026-3031.
344. Gautier A. Relation entre les taches du Soleil et les phénomènes magnétiques // *Journal of Archaeological Science*. – 1852. – Vol. 21. – P. 121-125.
345. Gellibrand H. A discourse mathematical on the variation of the magnetic needle together with its admirable diminution lately discovered // London: William Jones. 1635. – 22 p.
346. Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. On the relation between solar activity and seismicity on different time scales // *Journal of Atmospheric Electricity*. – 2002. – Vol. 22. – No. 3. – P. 291-300.
347. Georgieva K., Kirov B., Gavrusheva E. Geoeffectiveness of different solar drivers, and long-term variations of the correlation between sunspot and geomagnetic activity // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2006. – Vol. 31. – No. 1-3. – P. 81-87.
348. Glasmeier K.-H., Soffel H., Negendank J.F.W. *Geomagnetic field variations*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2009. 425 p
349. Gong S.J. Anomalous changes in transfer functions and the 1976 Tangshan earthquake ($M_S = 7.8$) // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1985. – Vol. 37. – P. 503-508.
350. Gonzalez A.C., Silbergleit V.M., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Annual variation of geomagnetic activity // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2001. – Vol. 63. – P. 367-374.
351. Gonzalez A.L.C., Gonzalez W.D., Dutra S.L.G., Tsurutani B.T. Periodic variation in the geomagnetic activity: A study based on the A_p index // *Journal of Geophysical Research*. – 1993. – Vol. 98. – P. 9215-9231.
352. Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., de Gonzalez C.A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Science Reviews*. – 1999. – Vol. 88. – P. 529-562.
353. Gopalswamy N., Makela P., Akiyama S., Yashiro S., Thakur N. CMEs during the two peaks in cycle 24 and their space weather consequences // *Sun and Geophysics*. – 2015. – Vol. 10. – No. 2. – P.111-118.
354. Gosling J.T., McComas D.J., Phillips J.L., Bame S.J. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections // *Journal of Geophysical Research*. – 1991. – Vol. 96. – No. A5. – P. 7831-7839.

355. Goubau W.M., Gamble T.D., Clarke J. Magnetotelluric data analysis: Removal of bias. // *Geophysics*. – 1978. – Vol. 43. – P. 1157-1166.
356. Goubau W.M., Maxton P.M., Koch R.H., Clarke J. Noise correlation lengths in remote reference magnetotellurics // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49. – P. 433-438.
357. Graham G. An account of observations made of the variation of the horizontal needle at London, in the latter part of the year 1722, and beginning of 1723 // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 1724. – Vol. 32. – P. 96-107.
358. Granger C. Investigating causal relations by econometric models and crossspectral methods. // *Econometrica*. – 1969. – Vol. 37. – P. 424-438.
359. Granger C., Newbold P. Spurious regressions in econometrics // *Journal of Econometrics*. – 1974. – Vol. 2. – P. 111-120.
360. Greaves W.M.H., Newton H.W. On the recurrence of magnetic storms // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1929. – Vol. 89. – P. 641-646.
361. Greener J.D., Schlapp D.M. A study of day-to-day variability of Sq over Europe // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1979. – Vol. 41. – P. 217-223.
362. Grubbs F.E. Procedures for detecting outlying observations in samples // *Technometrics*. – 1969. – Vol. 11. – No. 1. – P. 1-21.
363. Gupta J.C., Chapman S. Some statistics concerning the daily geomagnetic character figure Cp // *Pure and Applied Geophysics*. – 1967. – Vol. 68. – P. 103-113.
364. Hall C. M. Complexity signatures in the geomagnetic H component recorded by the Tromso magnetometer (70° N, 19° E) over the last quarter of a century // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2014. – Vol. 21. – P. 1051-1058.
365. Han Y., Guo Z., Wu J., Ma L. Possible triggering of solar activity to big earthquakes ($M_s > 8$) in faults with near west-east strike in China // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. – 2004. – Vol. 47. – P. 173-181.
366. Hanekop O., Simpson F. Error propagation in electromagnetic transfer functions: What role for the magnetotelluric method in detecting earthquake precursors? // *Geophysical Journal International*. – 2006. – Vol. 165. – P. 763-774.
367. Hapgood M.A. A double solar cycle in the 27-day recurrence of geomagnetic activity // *Annales Geophysicae*. – 1993. – Vol. 11. – No. 4. – P. 248-253.
368. Harinarayana T., Abdul Azeez K.K., Naganjaneyulu K., Manoj C., Veeraswamy K., Murthy D.N., Prabhakar Eknath Rao S. Magnetotelluric studies in Puga valley geothermal field, NW Himalaya, Jammu and Kashmir, India // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2004. – Vol. 138. – P. 405-424.
369. Hasegawa M. On the position of the focus of the geomagnetic Sq current system // *Journal of Geophysical Research*. – 1960. – Vol. 65. – P.1437-1447.
370. Hattori K., Han P., Yoshino C., Febriani F., Yamaguchi H., Chen C. Investigation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kanto, Japan during 2000 – 2010: Case studies and statistical studies // *Surveys in Geophysics*. – 2013. – Vol. 34. – P. 293-316.
371. Hayakawa M., Hattori K., Ohta K. Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. // *Sensor*. – 2007. – Vol. 7. – No. 7. – P. 1108-1122.
372. Heelis R.A. Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: A tutorial. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2004. – Vol. 66. – P. 825-838.
373. Hernandez G. Time series, periodograms, and significance // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104. – No. A5. – P. 10355-10368.
374. Hibberd F.H., The geomagnetic Sq variation – annual, semi-annual and solar cycle variations and ring current effects // // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1985. – Vol. 47. – P. 341-352.
375. Hide R. A note on short term core-mantle coupling, geomagnetic secular variations impulses, and potential magnetic field invariants as Lagrangian tracers of core motions // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1985. – Vol. 39. – No. 4. – P. 297-300.

376. Hill G.J., Caldwell T.G., Heise W., Chertkoff D.G., Bibby H.M., Burgess M.K., Cull J.P., Cas R.A.F. Distribution of melt beneath Mount St. Helens and Mount Adams inferred from magnetotelluric data // *Nature Geoscience*. – 2009. – Vol. 2. – P. 785-789.
377. Hoaglin D.C., Mosteller F., Tukey J.W. *Understanding robust and exploratory data analysis* // New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 477 p.
378. Hollingsworth A. The effect of ocean and Earth tides on the semi-diurnal lunar air tide // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1971. – Vol. 28. – P. 1021-1044.
379. Hongre L., Sailhac P., Alexandrescu M., Dubois J. Nonlinear and multifractal approaches of the geomagnetic field // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1999. Vol. 110. – No. 3-4. – P. 157-190.
380. Hussein M.E.A., Odling N.E., Clark R.A. Borehole water level response to barometric pressure as an indicator of aquifer vulnerability // *Water resources research*. – 2013. – Vol. 49. – P. 7102-7119.
381. Hwang J., Kim H.-P., Park Y.-D. Diurnal and seasonal variations in mid-latitude geomagnetic field during international quiet days: BOH magnetometer // *Journal of Astronomy and Space Sciences*. – 2012. – Vol. 29. – No.4. – P. 329-336.
382. Ingham M.R., Bibby H.M., Heise W., Jones K.A., Cairns P., Dravitzki S., Bennie S.L., Caldwell T.G., Ogawa Y. A. Magnetotelluric study of Mount Ruapehu volcano, New Zealand // *Geophysical Journal International*. – 2009. – Vol. 179. – P. 887-904.
383. Iyemori T. Storm-time magnetospheric currents inferred from midlatitude geomagnetic field variations // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1990. – Vol. 42. – P. 1249-1265.
384. Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. – 2000. – Vol. 358. – P. 957–990.
385. Jacobs J.A. *Geomagnetism* / London, Orlando: Academic Press, 1987. – 579 p.
386. Jahandari H., Farquharson C.G. 3-D minimum-structure inversion of magnetotelluric data using the finite-element method and tetrahedral grids // *Geophysical Journal International*. – 2017. – Vol. 211. – P. 1189-1205.
387. Jahandari H., Farquharson C.G. Finite-volume modeling of geophysical electromagnetic data on unstructured grids using potentials // *Geophysical Journal International*. – 2015. – Vol. 202. – P. 1859-1876.
388. Jahandari H., Farquharson C.G. Finite-volume modelling of geophysical electromagnetic data on unstructured grids using potentials // *Geophysics*. – 2014. – Vol. 79. – P. E287–E302.
389. Jarque C.M., Bera A.K. A test for normality of observations and regression residuals // *International Statistical Review*. – 1987. – Vol. 55. – No. 2. – P. 163-172.
390. Jault D., Gire C., Le Mouel J.L. Westward drift, core motions and exchanges of angular momentum between core and mantle // *Nature*. – 1988. – Vol. 333. – No. 6171. – P. 353-356.
391. Johnston J.M., Pellerin L., Hohmann G.W. Evaluation of electromagnetic methods for geothermal reservoir detection // *Geothermal Resources Council*. – 1992. – Vol. 16. – P. 241-245.
392. Jones A.G., Chave A., Egbert G., Auld D., Bahr K. A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation // *Journal of Geophysical Research* – 1989. – Vol. 94. – P. 14201-14213.
393. Junge A. A new telluric KCL probe using filloux's AgAgCl electrode // *Pure and Applied Geophysics*. – 1990. – Vol. 134. – No. 4. – P. 589-598.
394. Junge A. Characterization and correction for cultural noise // *Surveys in Geophysics* – 1996. – Vol. 1. – No. 7. – P. 361–391.
395. Kamide Y., Kusano K. Is something wrong with the present solar maximum? // *Space Weather*. – 2013. – Vol. 11. – No. 4. – P. 140-141.
396. Kane R.P. Differences in the quasi-biennial oscillation and quasi-triennial oscillation characteristics of the solar, interplanetary, and terrestrial parameters // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. A01108, doi:10.1029/2004JA010606.
397. Karaczun K., Karaczun M., Bilinska M., Uhrynowski A. *Magnetic map of Poland 1:500000* / Warszawa: Polish Geological Institute, 1978. 1 p.

398. Kawano-Sasaki K., Miyahara S. A study on three-dimensional structures of the ionospheric dynamo currents induced by the neutral winds simulated by the Kyushu-GCM // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 2008. – Vol. 70. – P. 1549-1562.
399. Kendall M., Gibbons J.D. Rank correlation methods // New York: Oxford University Press, 1990. – P. 8-10.
400. Khain V.E., Khalilov E.N. About possible Influence of solar activity upon seismic and volcanic activities: Long-Term forecast // *Science without Borders, Transactions of the International Academy of Science H and E. Innsbruck.: Science without Borders*, 2009. – Vol. 3.– C. 217-240.
401. Kharin E.P. Changes in transfer functions with time // *Surveys in Geophysics*. – 1982. – Vol. 4. – P. 455-466.
402. Kim J.-H., Chang H.-Y. Spectral analysis of geomagnetic activity indices and solar wind parameters // *Journal of Astronomy and Space Sciences*. – 2014. – Vol. 31. – No. 2. – P. 159-167.
403. Kirov B., Georgieva K. Solar cycle influence on the seismic activity // *Bulgarian Journal of Physics*. – 2000. – Vol. 27. – No. 2. – P. 35-42.
404. Kishcha P.V., Dmitrieva I.V., Obridko V.N. Long-term variations of the solar – geomagnetic correlation, total solar irradiance, and northern hemispheric temperature (1868-1997) // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1999. – Vol. 61. – P. 799-808.
405. Klausner V., Papa A.R.R., Mendes O., Domingues M.O., Frick P. Characteristics of solar diurnal variations: A case study based on records from the ground magnetic station at Vassouras, Brazil // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2013. – Vol. 92. – P. 124-136.
406. Kopytenko, Y.A., Matishvili T.G., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Molchanov O.A. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1993. – Vol. 77. – P. 85-95
407. Korte M., Manda M., Matzka J. A historical declination curve for Munich from different data sources // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2009. – Vol. 174. – P. 161-172.
408. Kotsarenko A., Enriquez P.R., Cruz-Abeyro L.J.A., Koshevaya S., Grimalsky V., Zuniga F.R. Analysis of the ULF electromagnetic emission related to seismic activity, Teoloyucan geomagnetic station, 1998 – 2001 // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2004. – Vol. 4. – P. 679-684.
409. Kotze P.B. The 2014 geomagnetic jerk as observed by southern African magnetic observatories // *Earth, Planets and Space*. – 2017. – Vol. 69. – No. 17. doi:10.1186/s40623-017-0605-7.
410. Kotze P.B. Signature of the 2007 geomagnetic jerk at the Hermanus Magnetic Observatory, South Africa // *Geological Society of South Africa*. – 2011. – Vol. 114. – No. 2. – P. – 207-210.
411. Kotze P.B. Spectrum analysis of short-period *K* index behaviour at high and mid-latitudes // *Annales Geophysicae*. – 2015. – Vol. 33. – P. 31-37.
412. Kotze P.B. The 2007 geomagnetic jerk as observed at the Hermanus Magnetic Observatory // *Comments in Physical Review Letters*. – 2010. – Vol. 2. – P. 5-6.
413. Kotze P.B., Korte M. Morphology of the southern African geomagnetic field derived from observatory and repeat station survey observations: 2005 – 2014 // *Earth Planets Space*. – 2016. – Vol. 68. – No. 23. doi:10.1186/s40623-016-0403-7
414. Kreil K. Einfluss des Mondes auf die magnetische Deklination // *Denkschriften der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*. – 1850. – Vol. 3. – P. 1-47.
415. Kuvshinov A.V., Utada H. Anomaly of the geomagnetic Sq variation in Japan: Effect from 3-D subterranean structure or the ocean effect? // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 183. – P. 1239-1247.
416. Lai G., Ge H., Wang W. Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band // *Journal of Geophysical research*. – 2013. – Vol. 118. – P. 1904-1924.
417. Lamarque G. Improvement of MT data processing using stationary and coherence tests // *Geophysical Prospecting*. – 1999. – Vol. 47. – P. 819-840.

418. Langel R.A. Kerridge D.J., Barraclough D.R., Malin S.R. Geomagnetic temporal change: 1903 – 1982, a spline representation // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1986. – Vol. 38. – P. 673-697.
419. Larnier H., Sailhac P., Chambodut A. New application of wavelets in magnetotelluric data processing: reducing impedance bias // *Earth, Planets and Space*. – 2016. – Vol. 68. – No.1. doi:10.1186/s40623-016-0446-9.
420. Larsen J. Transport and heat flux of the Florida current at 27 N derived from crossstream voltages and profiling data: Theory and observations. // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. – 1992. – Vol. 338. – P. 169-236.
421. Larsen J., Mackie R., Manzella A., Fiordelisi A., Rieven S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions // *Geophysical Journal International*. – 1996. – Vol. 124. – P. 801-819.
422. Larsen J.C. Electric and magnetic fields induced by deep sea tides // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1968. – Vol. 16. – P. 47-70.
423. Larsen J.C. Transfer functions: smooth robust estimates by least-squares and remote reference methods. // *Geophysical Journal International*. – 1989. – Vol. 99. – P. 645-663.
424. Le Mouel J.-L., Blanter E., Chulliat A., Shnirman M. On the semiannual and annual variations of geomagnetic activity and components // *Annales Geophysicae*. – 2004. – Vol. 22. – P. 3583-3588.
425. Le Mouel J.-L., Courtillot V. Core motions, electromagnetic core-mantle coupling and variations in the Earth's rotation: new constraints from geomagnetic secular variation impulses // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1981. – Vol. 24. – P. 236-241.
426. Legrand J.P., Simon P.A. Comment on "Geomagnetic and solar wind cycles 1900 – 1975" by Joan Feynman // *Journal of Geophysical Research*. – 1983. – Vol. 88. – P. 8137-8138.
427. Legrand J.P., Simon P.A. Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. I. The contributions to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind // *Annales Geophysicae*. – 1989. – Vol. 7. – P. 565-578.
428. Legrand J.P., Simon P.A. Ten cycles of solar and geomagnetic activity // *Solar Physics*. – 1981. – Vol. 70. – P. 173-195.
429. Lei J., Thayer J.P., Forbes J.M., Sutton E.K., Nerem R.S. Rotating solar coronal holes and periodic modulation of the upper atmosphere // *Geophysical Research Letter*. – 2008. – Vol. 35. – L10109, doi:10.1029/2008GL033875
430. Lezaeta P., Muroz M., Brasse H. Magnetotelluric image of the crust and upper mantle in the backarc of the northwestern Argentinean Andes // *Geophysical Journal International*. – 2000. – Vol. 142. – P. 841-854.
431. Liu H.-L., Yudin V.A., Roble R.G. Day-to-day ionospheric variability due to lower atmosphere perturbations // *Geophysical Research Letter*. – 2013. – Vol. 40. P. 665-670.
432. Love J.J., Gannon J.L. Revised *Dst* and the epicycles of magnetic disturbance: 1958-2007 // *Annales Geophysicae*. – 2009. – Vol. 27. – P. 3101-3131.
433. Love J.J., Rigler E.J. The magnetic tides of Honolulu // *Geophysical Journal International*. – 2014. – Vol. 197. – No. 3. – P. 1335-1353.
434. Love J.J., Rigler E.J., Gibson S.E. Geomagnetic detection of the sectorial solar magnetic field and the historical peculiarity of minimum 23-24 // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. – P. 1165-1170. L04102, doi:10.1029/2011GL050702.
435. Love J.J., Thomas J.N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – Vol. 40. – P. 1165-1170.
436. Lui A.T.Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2002. – Vol. 64. – P. 125-143, .
437. Lyatsky W., Newell P.T., Hamza A. Solar illumination as cause of the equinoctial preference for geomagnetic activity // *Geophysical Research Letters*. – 2001. – Vol. 28. – P. 2353-2356.
438. Macmillan S. A geomagnetic jerk for the early 1990's // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1996. – Vol. 137. – P. – 189-192.
439. Madden T., Nelson P. A defence of Cagniard's magnetotelluric method // *Geophysics Laboratory*. Cambridge: Project NR. – 1964. – P. 371-401.

440. Maeda H., Fujiwara M. Lunar ionospheric winds deduced from the dynamo theory of geomagnetic variations // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1967. – Vol. 29. – P. 917-936.
441. Malin S.R.C. Winch D.E. Annual variation of the geomagnetic field // *Geophysical Journal International*. – 1996. – Vol. 124. – P. 170-174.
442. Malin S.R.C. Winch D.E., Isikara A.M. Semi-annual variation of the geomagnetic field // *Earth Planets Space*. – 1999. – Vol. 51. – P. 321-328.
443. Malin S.R.C., Bullard E. The direction of the Earth's magnetic field at London, 1570-1975 // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1981. – Vol. 299. – P. 357-423.
444. Malin S.R.C., Cecere A., Palumbo A. The sunspot cycle influence on lunar and solar daily variations // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1975. – Vol. 41. – P. 115-126.
445. Malin S.R.C., Hodder B.M. Was the 1970 geomagnetic jerk of internal or external origin. // *Nature*. – 1982. – Vol. 296. – P. 726-728.
446. Malin S.R.C., Isikara A.M. Annual variation of the geomagnetic field // *Geophysical Journal International*. – 1976. – Vol. 43. – No. 3. – P. 445-457.
447. Malin S.R.C., Saunder I. Rotation of the Earth's magnetic field // *Nature*. – 1973. – Vol. 248. – P. 111-126.
448. Manda M., Holme R., Pais A., Pinheiro K., Jackson A., Verbanac G. Geomagnetic jerks: rapid core field variations and core dynamics // *Space Science Reviews*. – 2010. – Vol. 155. – P. 147-175.
449. Manoj C., Nagarajan N. The application of artificial neural networks to magnetotelluric time-series analysis // *Geophysical Journal International*. – 2003. – Vol. 153. – P. 409-423.
450. Marple S.L. *Digital spectral analysis with applications* / New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1987. – 512 p.
451. Masci F. On the ULF magnetic ratio increase before the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake by Hirano and Hattori (2011) // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2012. – Vol. 56. – P. 258-262.
452. Matsushita S., Campbell W.H. *Physics of geomagnetic phenomena* // New York: Academic Press, 1967. – 1398 p.
453. Matsushita S., Maeda H. On the geomagnetic solar quiet day variation field during the IGY // *Journal of Geophysical Research* – 1965. – Vol. 70. – P. 2535-2558.
454. Matsushita S., Xu W.-Y. Equivalent ionospheric current systems representing solar daily variations of the polar geomagnetic field // *Journal of Geophysical Research*. – 1982. – Vol. 87. – No. A10. – P. 8241-8254.
455. Matzka J., Chulliat A., Manda M., Finlay C.C., Qamili E. Geomagnetic observations for main field studies: From ground to space // *Space Science Reviews*. – 2010. – Vol. 155. – No. 1-4. – P. 29-64.
456. Maunder E.W. Magnetic disturbances, 1882 to 1903 as recorded at the Royal Observatory Greenwich, and their associations with sunspots // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1905. – Vol. 65. – P. 2-34.
457. Mayaud P.N. Analyse morphologique de la variabilite jour-a-jour de la variation journaliere reguliere S_R du champ magnetique terrestre, II. – Le systeme de courants C_M (Regions nonpolaires) // *Annales Geophysicae*. – 1965. – Vol. 21. – P. 514-544.
458. Mayaud P.N. Comment on "Semiannual variation of geomagnetic activity" by C.T.Russell and R.L.McPherron // *Journal of Geophysical Research* – 1974. – Vol. 79. – P. 1131-1134.
459. Mayaud P.N. *Derivation, meaning and use of geomagnetic indices* / Washington: American Geophysical Union, 1980. – 154 p.
460. Mayaud P.N. The *aa* index: a 100-year series characterizing the geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research* – 1972. – Vol. 77. – P. 68-70.
461. Mazaudier C., Blanc M. Electric currents above Saint-Santin: 2. Model // *Journal of Geophysical Research*. – 1982. – Vol. 87. – P. 2465-2480.
462. Mazzarella A., Palumbo A. Solar, geomagnetic and seismic activity // *Nuovo Cimento C. Serie 1*. – 1988. – Vol. 11c. – P. 353-364.

463. McComas D.J., Angold N., Elliott H.A., Livadiotis G., Schwadron N.A., Skoug R.M., Smith C.W. Weakest solar wind of the space age and the current "Mini" solar maximum // *Astrophysical Journal*. – 2013. – Vol. 779. – No. 1. doi:10.1088/0004-637X/779/1/2.
464. McIntosh D.H. On the annual variation of magnetic disturbance // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 1959. – Vol. 251. – P. 525-552.
465. McKnight J.D. Lunar daily geomagnetic variations in New Zealand // *Geophysical Journal International*. – 1995. – Vol. 122. – P. 889-898.
466. McLeod M.G. On the geomagnetic jerk of 1969 // *Journal of Geophysical Research*. – 1985. – Vol. 90. – P. 4597-4610.
467. Meeus J. Sunspots and earthquakes // *Physics Today*. – 1976. – Vol. 29. – No. 6. – P. 11.
468. Mendoza B., Pazos M., González L.X. New perspectives on contributing factors to the monthly behavior of the *aa* geomagnetic index // *Earth, Planets and Space*. – 2016. – Vol. 68. – No. 200. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0569-z>.
469. Menvielle M. Derivation and dissemination of geomagnetic indices // *Review of Geophysics*. – 1998. – Vol. 48, – P. 51-66.
470. Meyer J. A 12-month wave in geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1972. – Vol. 77. – P. 3566-3574.
471. Meyer Y. *Wavelets: Algorithms and Applications* / Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993. – 134 p.
472. Meyers H., Davis W. A profile of the geomagnetic model user and abuser // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1990. – Vol. 42. – № 9. – P. 1079-1085.
473. Middleton G.V. *Data analysis in the Earth sciences using MatLab* // New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River, 2000. – 246 p.
474. Miesch M.S., Toomre J. Turbulence, magnetism, and shear in stellar interiors // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2009. – Vol 41. – P. 317-345.
475. Molchanov O.A., Kopytenko Y.A., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Matiashvili T.G., Fraser-Smith A.C., Bernardi A. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak ($m_s=6.9$) and Loma Prieta ($M_s=7.1$) earthquakes: Comparative analysis // *Geophysical Research Letters*. – 1992. – Vol. 19. – P. 1495-1498.
476. Morat R., LeMouél J.L., Granier A. Electrical potential on a tree. A measurement of sap flow? // *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. – 1994. – Vol. 317. – P. 98-101.
477. Muller A. A new method to compensate for bias in magnetotellurics // *Geophysical Journal International*. – 2000. – Vol. 142. P. 257-269.
478. Munch J.W. The annual variation of the Earth-magnetic activity according to the character figures *Ci* // *Planetary and Space Science*. – 1972. – Vol. 20. – P. 225-231.
479. Munos G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods // *Surveys in Geophysics*. – 2014. – Vol. 35. – P. 101-122.
480. Mursula K., Tanskanen E., Love J.J. Spring-fall asymmetry of substorm strength, geomagnetic activity and solar wind: Implications for semiannual variation and solar hemispheric asymmetry // *Geophysical Research Letters*. – 2011. – Vol. 38. – L06104. doi:10.1029/2011GL046751.
481. Mursula K., Zieger B. The 13.5-day periodicity in the Sun, solar wind, and geomagnetic activity: The last three solar cycles // *Journal of Geophysical Research* – 1996. – Vol. 101. – P. 27077-27090.
482. Muzy J.F., Bacry E., Arneodo A. The multifractal formalism revisited with wavelets // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 1994. – Vol. 4. – P. 245-302.
483. Nayar P.S.R., Radhika V.N., Revathy K., Ramadas V. Wavelet analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters // *Solar Physics*. – 2002. – Vol. 208. – No. 2. – P. 359-373.
484. Neska A., Reda J., Neska M., Sumaruk Yu. On the influence of DC railway noise on variation data from Belsk and Lviv geomagnetic observatories // *Acta Geophysica*. – 2013. – Vol. 61. – No. 2. – P. 385-403.
485. Neupert W.M., Pizzo V. Solar coronal holes as sources of recurrent geomagnetic disturbances // *Journal of Geophysical Research*. – 1974. – Vol. 79. – P. 3701-3709.

486. Newman G.A., Gasperikova E., Hoversten G.M., Wannamaker P.E. Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Coso geothermal field // *Geothermics*. – 2008. doi:10.1016/j.geothermics.2008.02.006.
487. Newman G.A., Recher S., Tezkan B., Neubauer F.M. 3D inversion of a scalar radio magnetotelluric field data set // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68. – P. 791-802.
488. Niblett E. R., Honkura Y. Time-dependence of electromagnetic transfer functions and their association with tectonic activity // *Geophysical Survey*. – 1980. – Vol. 4. – P. 97-114.
489. Nichols E., Morrison H., Clarke J. Signals and noise in measurements of low frequency geomagnetic fields // *Journal of Geophysical Research*. – 1988. – Vol. 93. – No. 1311. – P. 13743-13754.
490. Nikouravan B. Do solar activities cause local earthquakes? (New Zealand) // *International Journal of Fundamental Physical Sciences*. – 2012. – Vol. 2. – No. 2. – P. 17-20.
491. Nikouravan B., Pirasteh S., Mollae S. The effect of solar cycle's activities on earthquake: A conceptual idea for forecasting. // *Disaster Advances*. – 2013. – Vol. 6. – No. 4. – P. 14-21.
492. Nikouravan B., Rawal J.J., Sharifi R., Nikkhah, M. Probing relation between solar activities and seismicity // *International Journal of the Physical Sciences*. – 2012. – Vol. 7. – No. 24. – P. 3082-3088.
493. Nishida N., Lyon E.F. Plasma sheet at lunar distances: Structure and solar wind dependence // *Journal of Geophysical Research* – 1972. – Vol. 77. – P. 4086-4093.
494. 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. doi:10.1007/s11589-017-0181-8.
495. Nowozynski K., Ernst T., Jankowski J. Adaptive smoothing method for computer derivation of *K*-indices // *Geophysical Journal International*. – 1991. – Vol. 104. – P. 85–93.
496. Obiekezie T. N., Obiadazie S. C., Agbo G. A. Day-to-day variability of *H* and *Z* components of the geomagnetic field at the African longitudes // *International Scholarly Research Notices Geophysics*. – 2013. – Vol. 2013. doi:10.1155/2013/909258.
497. Odintsov S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2006. – Vol. 31. – No. 1–3. – P. 88-93.
498. Oettinger G., Haak V., Larsen J.C. Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal-noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif. // *Geophysical Journal International*. – 2001. – Vol. 146. – P. 659-669.
499. Ohta K., Izutsu J., Schekotov A., Hayakawa M. The ULF/ELF electromagnetic radiation before the 11 March 2011 Japanese earthquake // *Radio Science*. – 2013. – Vol. 48. – P. 589-596.
500. Okeke F.N., Hamano Y. Daily variations of geomagnetic *H*, *D* and *Z*- field at equatorial latitudes // *Earth Planets Space*. – 2000. – Vol. 52. – P. 237-243.
501. Okeke F.N., Obiora D.N. Application of solar quiet day (*S_q*) current in determining mantle electrical-depth conductivity structure – a review // *Journal of African Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 114. – P. 54-62.
502. Olsen N., Manda M. Investigation of a secular variation impulse using satellite data: The 2003 geomagnetic jerk // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2007. – Vol. 255. – P. 94-105.
503. Olsen N., Manda M. Rapidly changing flows in the Earth's core // *Nature Geoscience*. – 2008. – Vol. 1. – P. 390-394.
504. Olson W.P. Contribution of nonionospheric currents to the quiet daily magnetic variations at the earth's surface // *Journal of Geophysical Research*. – 1970. – Vol. 75. – P. 7244-7249.
505. Orlando M., Moreno G., Parisi M., Storini M. Semiannual variation of geomagnetic activity and solar wind parameters // *Geophysical Research Letters*. – 1993. – Vol. – 20. – P. 2271-2274.
506. Orlando M., Moreno G., Parisi M., Storini M. The diurnal modulation of geomagnetic activity by the southward component of the geomagnetic field // *Journal of Geophysical Research* – 1995. – Vol. 100. – No. 10. – P. – 19565-19570.

507. Oskooi B., Takalu M., Montahaei M., Rahmani M.R. A recent magnetotelluric investigation of the Sabalan geothermal field in north-western Iran // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. – 2016. – Vol. 57. – No. 3. – P. 261-274.
508. Padua M.B., Padilha A.L., Vitorello Í. Disturbances on magnetotelluric data due to DC electrified railway: A case study from southeastern Brazil // *Earth, Planets and Space*. – 2002. – Vol. 54. – P. 591-596.
509. Pal S., Beheshti S. A new look at frequency resolution in power spectral density estimation // *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Image and Signal Processing*. – 2007. – P. 88-94.
510. Palumbo A. Lunar and solar daily variations of the geomagnetic field at Italian stations/ // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1981. – Vol. 43. – No. 7. – P. 633- 642.
511. Park J., Chave A.D. On the estimation of magnetotelluric response functions using the singular value decomposition // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1984. – Vol. 77. – P. 683-709.
512. Parkinson W.D., Jones F.W. The geomagnetic coast effect // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. – 1979. – Vol. 17. – P. – 1999-2015.
513. Peacock J.R., Thiel S., Reid P., Heinson G. Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: Example from an enhanced geothermal system // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. – L18403. doi:10.1029/– 2012GL053080.
514. Pearson K. Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity and panmixia // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. – 1896. – Vol. 187. – P. 253-318.
515. Pedatella N.M., Forbes J.M., Richmond A.D. Seasonal and longitudinal variations of the solar quiet (S_q) current system during solar minimum determined by CHAMP satellite magnetic field observations // *Journal of Geophysical Research* – 2011. – Vol. 116. – A04317. doi:10.1029/2010JA016289.
516. Pedersen L.B., Bastani M., Dynesius L. Groundwater exploration using combined controlled-source and radio magnetotelluric techniques // *Geophysics*. – 2005. – Vol. 70. – P. 8-15.
517. Perrier V., Philipovitch T., Basdevant C. Wavelet spectra compared to Fourier spectra // *Journal of Mathematical Physics*. – 1995. – Vol. 36. – P. 1506-1519.
518. Petecki Z., Polechonska O. A new magnetic anomaly map of Poland and its contribution to the recognition of crystalline basement rocks // *Geological Quarterly*. – 2017. – Vol. 61. – No. 4. – P. 934-945.
519. Petiau G., Dupis A. Noise, temperature coefficient, and long-time stability of electrodes for telluric observations // *Geophysical Prospecting*. – 1980. – Vol. 28. – P. 792-804.
520. Pham Thi Thu H., Amory-Mazaudier C., Le Huy M. S_q field characteristics at Phu Thuy, Vietnam, during solar cycle 23: comparisons with S_q field in other longitude sectors // *Annales Geophysicae*. – 2011. – Vol. 29. – P. 1-17.
521. Pichon G., Aubert Ju., Fournier A. Coupled dynamics of Earth's geomagnetic westward drift and inner core super-rotation // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2016. – Vol. 437. – P. 114-126.
522. Pinheiro K.J., Jackson A., Finlay C.C. Measurements and uncertainties of the occurrence time of the 1969, 1978, 1991 and 1999 geomagnetic jerks // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2011. – Vol. 12. – Q10015. doi:10.1029/2011GC003706.
523. Prestes A., Rigozo N.R., Echer E., Vieira L.E.A. Spectral analysis of sunspot number and geomagnetic indices (1868 – 2001) // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2006. – Vol. 68. – P. 182-190.
524. Price A.T. The theory of magnetotelluric methods when the source field is considered // *Journal of Geophysical Research*. – 1962. – Vol. 67. – No. 5. – P. 1907-1918.
525. Qamili E., De Santis A., Isac A., Manda M., Duka B., Simonyan A. Geomagnetic jerks as chaotic fluctuations of the Earths magnetic field // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2013. – Vol. 14. – P. 839-850.
526. Rabeh T., Miranda M., Hvozdara M. Strong earthquakes associated with high amplitude daily geomagnetic variations // *Natural Hazards*. – 2010. – Vol. 53. – P. 561-574.

527. Rangarajan G.K., Iyemori T. Time variations of geomagnetic activity indices Kp and Ap : an update // *Annales Geophysicae*. – 1997. – Vol. 15. – P. 1271-1290.
528. Rassbach M.E., Dessler A.J., Cameron A.G.W. The lunar period, the solar period, and Kp // *Journal of Geophysical Research* – 1966. – Vol. 71. – P. 4141-4146.
529. Rich F.J., Reasoner D.L., Burke W.J. Plasma sheet at lunar distance: Characteristics and interactions with the lunar surface // *Journal of Geophysical Research*. – 1973. – Vol. 78. – No. 34. – P. 8097-8112.
530. Richardson I.G. Geomagnetic activity during the rising phase of solar cycle 24 // *Journal of Space Weather and Space Climate*. – 2013. – Vol. 3. doi:10.1051/swsc/2013031.
531. Richardson I.G., Cane H.V. Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles // *Journal of Space Weather and Space Climate*. – 2012. – Vol. 2. – No. A01. doi: 10.1051/swsc/2012001.
532. Richardson I.G., Cane H.V., Cliver E.W. Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972 – 2000) // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – Vol. 107. – No. A8. – P. 1-13.
533. Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V. Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972 – 2000 // *Geophysical Research Letters*. – 2001. – Vol. 28. – No. 13. – 2569-2572.
534. Richmond A.D., Modeling the ionosphere wind dynamo: A review. Quiet daily geomagnetic fields // *Pure and Applied Geophysics*. – 1989. – Vol. 131. – P. 413-435.
535. Riddick J.C., Stuart W.F. The generation of K -indices from digitally recorded magnetic data // *Geophysical Surveys*. – 1984. – Vol. 6. – No. 3-4. – P. 439-456.
536. Rikitake T. *Electromagnetism and the Earth's interior* / Amsterdam-London-New York: Elsevier, 2012. – 320 p.
537. Ritter P., Banks R.J. Separation of local and regional information in distorted GDS response functions by hypothetical event analysis // *Geophysical Journal International*. – 1998. – Vol. 135. – P. 923-942.
538. Rokityansky I. I., Klymkovych T.A., Babak V. I., Isac A. Variations of EM response function as indicator of geodynamic processes // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2011. – T. 2. – № 4. – P. 411-424.
539. Rokityansky I.I., Klymkovych T.A., Babak V.I., Isac A. Annual and diurnal variations of induction vectors in relation to geodynamic processes // *Geomatics, Natural Hazard and Risk*. – 2012. – Vol. 3. – No. 3. – P. 239-249.
540. Rokityansky I.I., Klymkovych T.A., Tereshyn A.V. An analysis of geomagnetic response functions prior to the Tohoku, Japan earthquake // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 2016. – Vol. 10. – No. 6. – P. 395-406.
541. Rosenberg R.L., Coleman P.J. Heliographic latitude dependence of the dominant polarity of the interplanetary magnetic field // *Journal of Geophysical Research*. – 1969. – Vol. 74. – P. 5611-5622.
542. Runcorn S.K. Geodynamic implications of short time changes in the geomagnetic dynamo // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1985. – Vol. 41. – P. 73-77.
543. Russell C. On the possibility of deducing interplanetary and solar parameters from geomagnetic records // *Solar Physics*. – 1975. – Vol. 42. – P. 259-269.
544. Russell C.T., Luhmann J.G., Jian L.K. How unprecedented a solar minimum? // *Review of Geophysics*. – 2010. – Vol. 48. – No. RG2004. doi:10.1029/2009RG000316.
545. Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research* – 1973. – Vol. 78. – P. 92-108.
546. Russell C.T., Mulligan T. The 22-year variation of geomagnetic activity: implications for the polar magnetic field of the Sun // *Geophysical Research Letters*. – 1995. – Vol. 22. – P. 3287-3288.
547. Sabine E. On the annual variation of the magnetic declination, at different periods of the day // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 1851. – Vol. 141. – P. 499-506.
548. Sabine E. On the lunar diurnal variation at Toronto // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 1856. – Vol. 146. – P. 499-506.

549. Saiz E., Cerrato Y., Cid C., Dobrica V., Hejda P., Nenovski P., Stauning P., Bochnicek J., Danov D., Demetrescu C., Gonzalez W.D., Maris G., Teodosiev D., Valach F. Geomagnetic response to solar and interplanetary disturbances // *Journal of Space Weather and Space Climate*. – 2013. – Vol. 3. – P. 9811-9813.
550. Sanford T.B. Motionally induced electric and magnetic fields in the sea // *Journal of Geophysical Research*. – 1971. – Vol. 76. – P. 3476-3492.
551. Santos F.M. Study of the Chaves geothermal field using 3D resistivity modeling // *Journal of Applied Geology*. – 1997. – Vol. 37. – P. 85-102.
552. Schlapp D.M. World-wide morphology of day-to-day variability of Sq // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1968. – Vol. 30. – P. 1761-1776.
553. Schlumberger M. The application of telluric currents to surface prospecting // *American Geophysical Union Transactions*. – 1939. – Vol. 20. – P. 271-277.
554. Schmucker U. An introduction to induction anomalies // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1970. – Vol. 22. – P. 9-33.
555. Schreiber H. On the periodic variations of geomagnetic activity indices A_p and a_p // *Annales Geophysicae*. – 1998. – Vol. 16. – P. 510-517.
556. Schultz A., Kurtz R.D., Chave A.D., Jones A.G. Conductivity discontinuities in the upper mantle beneath a stable craton // *Geophysical Research Letters*. – 1993. – Vol. 20. – P. 2941-2944.
557. Schuster A., Lamb H. The diurnal variation of terrestrial magnetism // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1889. – Vol. 45. – P.481-486.
558. Selway K., Jun Y., Karato S.-I. Water content of the Tanzanian lithosphere from magnetotelluric data: Implications for cratonic growth and stability // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2014. – Vol. 388. – P. 175-186.
559. Shapiro R. Interpretation of the subsidiary peaks at periods near 27 days in power spectra of geomagnetic disturbance indices // *Journal of Geophysical Research*. – 1967. – Vol. 72. – P. 4945-4949.
560. Shapiro R. Semiannual variation of geomagnetic disturbance and its modulation of shorter period variations // *Journal of Geophysical Research*. – 1969. – Vol. 74. – P. 23-56.
561. Shapiro R., Ward F.W. Three peaks near 27 days in high-resolution spectrum of the international magnetic character figure, C_i // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – P. 2385-2388.
562. Sheeley Jr. N.R., Asbridge J.S., Bame S.J., Harvey J.W. A pictorial comparison of interplanetary magnetic field polarity, solar wind speed, and geomagnetic disturbance index during the sunspot cycle // *Solar Physics*. – 1977. – Vol. 52. – P. 485-495.
563. Sheeley N.R., Harvey J.W., Feldman W.C. Coronal holes, solar wind streams, and recurrent geomagnetic disturbances 1973-1976 // *Solar Physics*. – 1976. – Vol. 49. – P. 271-278.
564. Shestopalov I.P., Kharin E. P. Secular variations of solar activity and seismicity of the Earth // *Geophysical Journal*. – 2006. – Vol. 28. – No. 4. – P. 59-70.
565. Shiraki M. Monitoring of the time change in transfer functions in the central Japan conductivity anomaly // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1980. – Vol. 32. – P. 637-648.
566. Shiraki M. Solar and lunar daily geomagnetic variations at Kakioka, Memambetsu and Kanoya, Japan, 1958 – 1973 // *Geophysical Magazine*. – 1977. – Vol. 38. – P. 37-69.
567. Shnirman M.G., Le Mouel J.-L., Blanter E.M. The 27-day and 22-year cycles in solar and geomagnetic activity // *Solar Physics*. – 2009. – Vol. 258. – No. 1. – P. 167-179.
568. Silva L., Hulot G. Investigating the 2003 geomagnetic jerk by simultaneous inversion of the secular variation and acceleration for both the core flow and its acceleration // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2012. – Vol. 198. – P. 28-50.
569. Simon P.A., Legrand J.P. Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. II – The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity // *Annales Geophysicae*. – 1989. – Vol. 7. – P. 579-593.
570. Simpson F., Bahr K. Practical magnetotellurics // Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 270 p.

571. Simpson J.F. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1968. – Vol. 3. – P. 417-425.
572. Sims W.E., Bostick F.X., Smith H.W. The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured time series // *Geophysics*. – 1971. – Vol. 36. – P. 938-942.
573. Singer S.F., Maple E., Bowen Jr. W.A. Evidence for ionosphere currents from rocket experiments near the geomagnetic equator // *Journal of Geophysical Research*. – 1951. – Vol. 56. – P. 265-281.
574. Singh Y.P., Badruddin D.V. Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity: Wavelet analysis. *Planetary and Space Science*. – 2014. – Vol. 96. – P. 120-124.
575. Singha Y.P., Badruddin D.V. Short- and mid-term oscillations of solar, geomagnetic activity and cosmic ray intensity during the last two solar magnetic cycles // *Planetary and Space Science*. – 2017. – Vol. 138. – P. 1-6.
576. Singha Y.P., Badruddin D.V. Solar-rotational oscillation and its harmonics in the solar-wind, geomagnetic and cosmic ray particles during the last two solar minima // *Astrophysics and Space Science*. – 2015. – Vol. 359. – No. 60. doi:10.1007/s10509-015-2503-4
577. Singharajwarapan F.S., Wood S.H., Prommakorn N., Owens L. Northern Thailand geothermal resources and development: a review and 2012 update // *Geothermal Resources Council*. – 2012. – Vol. 36. – P. 787-791.
578. Sinharay R.K.R., Srivastava S., Bhattacharya B.B.B. Audiomagnetotelluric studies to trace the hydrological system of thermal fluid flow of Bakreswar Hot Spring, Eastern India: a case history // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – P. B187-B195.
579. Siscoe G., Crooker N. Diurnal oscillation of *Dst*: a manifestation of the Russel-McPherron effect // *Journal of Geophysical Research* – 1996. – Vol. 101. – No. NA11. – P. 24985-24989.
580. Snyder C.W., Neugebauer M., Rao U. R. The solar wind velocity and its correlation with cosmic ray variations and with solar and geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1963. – Vol. 68. – 6361-6370.
581. Soare A., Cucu G., Manda-Alexandrescu M. Historical geomagnetic measurements in Romania // *Annals of Geophysics*. – 1998. – Vol. 41. – P. 539-554.
582. Spearman C. The proof and measurement of association between two things // *American Journal of Psychology*. – 1904. – Vol. 15. – P. 72-101.
583. Spichak V.V., Borisova V.P., Fainberg E.B., Khalezov A.A., Goidina A.G. Electromagnetic 3D tomography of the Elbrus volcanic center according to magnetotelluric and satellite data // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 2007. – Vol. 1. – P. 53-66.
584. Srivastava S.P. Application of the magnetotelluric method to anisotropic and inhomogeneous bodies // *Journal of Geophysical Research*. – 1963. – Vol. 68. – No. 20. – P. 5857-5868.
585. Srivastava S.P. Theory of the magnetotelluric method for a spherical conductor // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1966. – Vol. 2. – P. 373-387.
586. Stamper R., Lockwood M., Wild M.N., Clark T.D.G. Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104. – P. 28325-28342.
587. Stening R.J. An assessment of the contributions of various tidal winds to the *Sq* current system // *Planetary and Space Science*. – 1969. – Vol. 17. – P. 889-908.
588. Stening R.J. Problems of identifying lunar geomagnetic effects at Huancayo // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1975. – Vol. 27. – No. 5. – P. 409-424.
589. Stening R.J. The shape of the *Sq* current system // *Annales Geophysicae*. – 2008. – Vol. 26. – P. 1767-1775.
590. Stolov H. L. Further investigations of a variation of geomagnetic activity with lunar phase // *Journal of Geophysical Research*. – 1965. – Vol. 70. – P. 4921-4929.
591. Stolov H.L., Cameron A.G.W. Variations of geomagnetic activity with lunar phase // *Journal of Geophysical Research*. – 1964. – Vol. 69. – P. 4975-4982.
592. Stothers R.B. A search for long-term periodicities in large earthquakes of southern and coastal central California // *Geophysical Research Letters*. – 1990. – Vol. 17. – P. 1981-1984.

593. Straser V., Cataldi G. Solar wind ionic variation associated with earthquakes greater than magnitude M 6.0 // *New Concepts in Global Tectonics Journal*. – 2015. – Vol. 3. – P. 140-154.
594. Strestik J. Spectrum of geomagnetic activity in the period range 5 – 60 days: possible lunar influences // *Annales Geophysicae*. – 1998. – Vol. 16. – No. 7. – P. 804-811.
595. Sucksdorff E. The influence of the moon and the inner planets on the geomagnetic activity // *Geophysica*. – 1956. – Vol. 5. – P. 95-106.
596. Sugiura M., Poros D.J. Solar-generated quasi-biennial geomagnetic variation // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82. – No. 35. – P. 5621-5628.
597. Sutarno, D., Vozoff K. Robust M -estimation of magnetotelluric impedance tensor // *Exploration Geophysics*. – 1989. – Vol. 20. – P. 383-398.
598. Suto N., Harada M., Izutsu J., Nagao T. Time variation of the electromagnetic transfer function of the earth estimated by using wavelet transform // *Proceedings of the Japan Academy*. – 2006. – Vol. 82. – P. 175-180.
599. Suzuki A. Geomagnetic Sq field at successive universal times // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1978. – Vol. 40. – P. 449-463.
600. Suzuki A. UT and day-to-day variations in equivalent current systems for world geomagnetic variations // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1979. – Vol. 31. – P. 21-46.
601. Svalgaard L. Reconstruction of solar extreme ultraviolet flux 1740-2015 // *Solar Physics*. – 2016. – Vol. 291. – No. 9-10. – P.2981-3010.
602. Svalgaard L., Cliver E.W., Ling A.G. The semiannual variation of great geomagnetic storms // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Vol. 29, – No. 16. – P. 1765-1777.
603. Svalgaard L., Kamide Y. Asymmetric solar polar field reversals // *The Astrophysical Journal*. – 2012. – Vol. 763. – No. 1. doi:10.1088/0004-637X/763/1/23.
604. Szarka L. Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the Earth – A review // *Surveys in Geophysics*. – 1988. – Vol. 9. – P. 287-318.
605. Takayama T., Suzuki T. On the relation between the sunspot number and the destructive earthquakes in Japan // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*. – 1990. – Vol. 8. – No. 3. – P. 373-374.
606. Takeda M. Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field // *Journal of Geophysical Research*. – 2013. – Vol. 118. – P. 4516-4522.
607. Takeda M. Day-to-day variation of equivalent Sq current system during March 11–26, 1970 // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1984. – Vol. 36. P. 215-338.
608. Takeda M. Difference in seasonal and long-term variations in geomagnetic Sq fields between geomagnetic Y and Z components // *Journal of Geophysical Research*. – 1980. – Vol. 118. – P. 2522-2526.
609. Takeda M. UT variation of internal Sq currents and the oceanic effect during 1980 March // *Geophysical Journal International*. – 1985. – Vol. 80. – P. 649-659.
610. Takeda M., Araki T. Electric conductivity of the ionosphere and nocturnal currents // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1985. – Vol. 47. – P. 601-609.
611. Takeda M., Araki T. Time variation of instantaneous equivalent Sq current system // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1984. – Vol. 46. – P. 911-915.
612. Tarpley J.D. The ionospheric wind dynamo // *Planetary and Space Science*. – 1970. – Vol. 38. – P. 1091-1103.
613. Tarpley J.D. The O_1 component of the geomagnetic lunar daily variation // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1971. – Vol. 23. – No. 2. – P. 169-179.
614. Tavares M., Azevedo A. Influences of solar cycles on earthquakes. // *Natural Science*. – 2011. – Vol. 3. – No. 6. – P. 436-443.
615. Temmer M., Vrsnak B., Veronig A.M. Periodic appearance of coronal holes and the related variation of solar wind parameters // *Solar Physics*. – 2007. – Vol. 241. – P. 371-383.
616. Thebault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson – P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne

- X., Langlais B., Leger J.- M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Manda M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., Toffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. // *Earth, Planet and Space*. – 2015. – Vol. 67. – No. 1. – P. 1-195.
617. Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.S. On the reported magnetic precursor of the 1989 Loma Prieta earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2009. – Vol. 173. P. 207-215.
618. Thomson D.J., Chave A.D. Jackknife error estimates for spectra, coherences, and transfer functions. // *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*. – 1991. – Vol. 1. – P. 58-113.
619. Tietjen G.L, Moore R.H, Backman R.J. Testing for a single outlier in a simple linear regression // *Technometrics*. – 1973. – Vol 15. – P. 717-721.
620. Tietjen G.L., Moore R.H. Some Grubbs-type statistics for the detection of several outliers // *Technometrics*. – 1972. – Vol. 14. – P. 583-597.
621. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1998. – Vol. 79. – P. 605-618.
622. Torta J.M., Curto J.J., Bencze P. Behavior of the quiet day ionospheric current system in the European region // *Journal of Geophysical Research*. – 1997. – Vol. 102. P. 2483- 2494.
623. Torta J.M., Marsal S., Curto J.J., Gaya-Pique L.R. Behaviour of the quiet-day geomagnetic variation at Livingston Island and variability of the *S_q* focus position in the South American-Antarctic Peninsula region // *Earth, Planets and Space*. – 2010. – Vol. 62. – P. 297-307.
624. Torta J.M., Pavón-Carrasco F.J., Marsal S., Finlay C. Evidence for a new geomagnetic jerk in 2014 // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Vol. 42. – No. 19. – P. 7933-7940.
625. Torta J.M., Serrano L., Regue J.R., Sanchez A.M., Roldan E. Geomagnetically induced currents in a power grid of northeastern Spain // *Space Weather*. – 2012. – Vol. 10. – S06002. doi: 10.1029/2012SW000793.
626. Trad D.O., Travassos J.M. Wavelet filtering of magnetotelluric data // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65. – No. 2. – P. 482-491.
627. Travassos J.M., Beamish D. Magnetotelluric data processing – A case study // *Geophysical Journal International*. – 1988. – Vol. 93. – P. 377-391.
628. Triskova L. The vernal-autumnal asymmetry in the seasonal variation of geomagnetic activity // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1989. – Vol. 51. – P. 111-118.
629. Tsurutani B. T., Gonzalez E.D., Gonzalez A.L.C., Tang F., Arballo J.K., Okada M. Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle // *Journal of Geophysical Research*. – 1995. – Vol. 100. – P. 21717-21733.
630. Tsurutani B.T., Echer E., Guarnieri F.L., Gonzalez W.D. The properties of two solar wind high speed streams and related geomagnetic activity during the declining phase of solar cycle 23 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2011. – Vol. 73. – P. 164-177.
631. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Guarnieri F.L., Gopalswamy N., Grande M., Kamide Y., Kasahara Y., Lu G., Mann I., McPherron R., Soraas F., Vasyliunas V. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity// *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – Vol. 111. – P. 11107-11132.
632. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Akasofu S.I., Smith E.J. Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978 –1979) // *Journal of Geophysical Research*. – 1988. – Vol. 93. – P. 8519-8531.
633. Turcotte D.L. *Fractal and chaos in exploration geophysics* / Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 398 p.
634. Urrutia-Fucugauchi J., Campos-Enríquez J.O. Geomagnetic secular variation in Central Mexico since 1923 AD and comparison with 1945 – 1990 *IGRF* models // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1993. – Vol. 45. – P. 243-249.
635. van Bemmelen W. Berichtigung zu meiner Abhandlung fiber die lunare variation des Erdmagnetismus // *Meteorologische Zeitschrift*. – 1913. – Vol. 30. – P. 589-594.

636. Vargas C.A., Kastle E.D. Does the sun trigger earthquakes? // *Natural Science*. – 2012. – Vol. 4. – P. 595-600.
637. Vasyliunas V.M. The mechanical advantage of the magnetosphere: solar-wind-related forces in the magnetosphere-ionosphere-Earth system // *Annales Geophysicae*. – 2007. – Vol. 25. – P. 255-269.
638. Vasyliunas V.M. The physical basis of ionospheric electrodynamics // *Annales Geophysicae*. – 2012. – Vol. 30. – P. 357-369.
639. Veeder M. A. Thunderstorms, auroras, and sunspots // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1893. – Vol. 7. – No. 10. – P. 105-106.
640. Venkatesan D., Shukla A.K., Agrawal S.P. Cosmic ray intensity variations and two types of high speed solar streams // *Solar Physics*. – 1982. – Vol. 81. – P. 375-381.
641. Verma V.K., Joshi G.C. On the occurrence rate of high-speed solar wind events // *Solar Physics*. – 1994. – Vol 155. – P. 401-404.
642. Vestine E.H. Winds in the upper atmosphere deduced from the dynamo theory of geomagnetic disturbances // *Journal of Geophysical Research*. – 1954. – Vol. 59. – P. 93-128.
643. Vinogradov E., Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N. Earth tide analysis specifics in case of unstable aquifer regime // *Pure and Applied Geophysics*. – 2017. – Vol. 174. – No. 6. doi:10.1007/s00024-017-1585-z.
644. Volpi G., Manzella A., Fiordelisi A. Investigation of geothermal structures by magnetotellurics (MT): an example from the Mt. Amiata area, Italy // *Geothermics*. – 2003. – Vol. 32. – P. 131-145.
645. Voros Z. On multifractality of high-latitude geomagnetic fluctuations // *Annales Geophysicae*. – 2000. – Vol. 18. – P. 1273-1282.
646. Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // *Geophysics*. – 1972. – Vol. 37. – No.1. – P. 98-141.
647. Wait J.R. On the relation between telluric currents and the Earth's magnetic field // *Geophysics*. – 1954. – Vol. 19. – P. 281-289.
648. Walker J.B., O'Dea, P.L. Geomagnetic secular change impulses // *Transactions of the American Geophysical Union*. – 1952. – Vol. 33. – P. 797-800.
649. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and water. Lecture notes in Earth sciences / Berlin: Springer, 2010. – Vol. 114. – 249 p.
650. Wang Y.M., Sheeley N.R. Understanding the geomagnetic precursor of the solar cycle // *Astrophysical Journal*. – 2009. – Vol. 694. – P. L11-L15.
651. Wanliss J.A. Fractal properties of SYM-H during quiet and active times // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110. – A03202. doi:10.1029/2004JA010544.
652. Wanliss J.A., Shiokawa K., Yumotom K. Latitudinal variation of stochastic properties of the geomagnetic field // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2014. – Vol. 21. – P. 347-356.
653. Ward F.W. The variance (power) spectra of C_i , K_p , and A_p // *Journal of Geophysical Research*. – 1960. – Vol. 65. – P. 2359-2373.
654. Wardinski I., Holme R., Asari S., Manda M. The 2003 geomagnetic jerk and its relation to the core surface flows // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2008. – Vol. 267. – P. 468-481.
655. Wardinski I., Manda M. Annual and semi-annual variations of the geomagnetic field components analysed by the multi-taper method // *Earth Planets and Space*. – 2006. – Vol. 58. – No. 6. – P.785-791.
656. Watari S., Kato H., Yamamoto K. Hit rate of space weather forecasts of the Japanese forecast center and analysis of problematic events on the forecasts between June 2014 and March 2015 // *Sun and Geophysics*. – 2015. – Vol. 10. – No. 2. – P. 163-171.
657. Wawrzyniak P., Sailhac P., Marquis G. Reply to comment of A.D. Chave on "Robust error on magnetotelluric impedance estimates" by P. Wawrzyniak, P. Sailhac and G. Marquis // *Geophysical Prospecting*. – 2016. – Vol. 64. – P. 250-251.
658. Wawrzyniak P., Sailhac P., Marquis G. Robust error on magnetotelluric impedance estimates // *Geophysical Prospecting*. – 2013. – Vol. 61. – P. 533-546.

659. Webb D.F., Cliver E.W., Crooker N., St. Cyr O.C., Thompson B.J. The relationship of halo CMEs, magnetic clouds and geomagnetic storms // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105. – No. A4. – P. 7491-7508.
660. Webb D.F., Hundhausen A.J. Activity associated with the solar origin of coronal mass ejections // *Solar Physics*. – 1987. – Vol. 108. – No. 3. – P. 383-401.
661. Weckmann U., Magunia A., Ritter O. Effective noise separation for magnetotelluric single site data processing using a frequency domain selection scheme // *Geophysical Journal International*. – 2005. – Vol. 161. – P. 635-652.
662. Wei H.L., Billings S.A., Balikhin M. Analysis of the geomagnetic activity of the *Dst* index and self-affine fractals using wavelet transforms // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2004. – Vol. 11. – P. 303-312.
663. Weingarten M., Ge S. Insights into water level response to seismic waves: A 24 year high-fidelity record of global seismicity at Devils Hole // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – Vol. 41. – No. 1. – P. 74-80.
664. Wilcox J.M., Ness N.F. Quasi-stationary corotating structure in the interplanetary medium // *Journal of Geophysical Research*. – 1965. – Vol. 70. – No. 23. – P. 5793-5805.
665. Winch D.E. Geomagnetic lunar partial tides // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1970. – Vol. 22. – P. 291-318.
666. Wolf R. On the periodic return of the minimum of sunspots: The agreement between those periods and the variations of magnetic declination // *Philosophical Magazine*. – 1853. – № 5. – 67 p.
667. Wolf R. Sur la retour periodique de minimums de taches solaires; concordance entre des periodes et les variations de declinaison magnetique // *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'acad. des sciences. Paris*. – 1852. – Vol. XXXV. – P. 704-705.
668. Worzewski T., Jegen M., Kopp H., Brasse H., Taylor C. Magnetotelluric image of the fluid cycle in the Costa Rican subduction zone // *Nature Geoscience*. – 2011. – Vol. 4. – No. 2. – P. 108-111.
669. Wulf O.R. A possible effect of atmospheric circulation in the daily variation of the Earth's magnetic field // *Monthly Weather Review*. – 1963. – Vol. 91. – P. 520-526.
670. Xu G., Han P., Huang Q., Hattori K., Febriani F., Yamaguchi H. Anomalous behaviors of geomagnetic diurnal variations prior to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M_w 9.0) // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2013. – Vol. 77. – P. 59–65.
671. Yamazaki Y., Yumoto K. Long-term behavior of annual and semi-annual *Sq* variations // *Earth Planets and Space*. – 2012. – Vol. 64. – No. 6. – P. 417-423.
672. Yamazaki Y., Kosch M.J. Geomagnetic lunar and solar daily variations during the last 100 years // *Journal of Geophysical Research*. – 2014. – Vol. 119. – P. 6732-6744.
673. Yamazaki Y., Maute A. *Sq* and EEJ A review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo // *Space Science Reviews*. – 2017. – Vol. 206. – No. 1-4. – P. 299-405.
674. Yanagihara K., Nagano T. Time change of transfer function in the Central Japan anomaly // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. – 1976. – Vol. 28. P. 157-163.
675. Yanben H., Zengjian G., Jibing W., Lihua M. Possible triggering of solar activity to big earthquakes ($M_s > 8$) in faults with near west-east strike in China // *Science in China Ser. G. Physics, Mechanics and Astronomy*. – 2004. – Vol. 47. – No. 2. – P. 173-181.
676. Yesugey S.C. Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula // *Earth Sciences Research Journal*. – 2009. – Vol. 13. – No. 1. – P. 82-89.
677. Yukutake T. The westward drift of the magnetic field of the Earth // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*. – 1962. – Vol. 40. – P. 1-65.
678. Zaourar N., Hamoudi M., Manda M., Balasis G., Holschneider M. Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance // *Earth, Planets and Space*. – 2013. – Vol. 65. – P. 1525-1540.
679. Zhang L., Gu T., Zhao J., Ji Sh., Hu M., Li X. An improved moving least squares method for curve and surface fitting // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2013. – Vol. 2013. doi:10.1155/2013/159694.

680. Zhang L., Hao T., Xiao Q., Wang J., Zhou L., Qi M., Cui X., Cai N. Magnetotelluric investigation of the geothermal anomaly in Hailin, Mudanjiang, northeastern China // *Journal of Applied Geophysics*. – 2015. – Vol. 118. – P. 47-65.
681. Zhao H., Zong Q.-G. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Russell-McPherron effect during different IMF polarity and/or extreme solar wind conditions // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – Vol. 117. – A11222, doi:10.1029/2012JA017845.
682. Zieger B., Mursula K. Annual variation in near-Earth solar wind speed: Evidence for persistent north-south asymmetry related to solar magnetic polarity // *Geophysical Research Letters*. – 1998. – Vol. 25. – P. 841-844.
683. Zois I.P. Solar activity and transformer failures in the Greek national electric grid // *Journal of Space Weather and Space Climate*. – 2013. – Vol. 3. – A32. doi.:10.1051/swsc/-2013055.
684. Zossi de Artigas, M., Elias A. G., Fernandez de Campra P. Discrete wavelet analysis to assess long-term trends in geomagnetic activity // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2006. – Vol. 31. – P. 77-80.
685. Zou K.H., Tuncali K., Silverman S.G. Correlation and simple linear regression // *Radiology*. – 2003. – Vol. 227. – No. 3. – P. 617-622.
686. Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского: [сайт]. URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/>
687. Геофизическая обсерватория "Михнево" Института динамики геосфер Российской академии наук: [сайт]. URL: <http://www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/data/>
688. Международная магнитная сеть INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network): [сайт]. URL: <http://www.intermagnet.org>
689. Deutsche GeoForschungsZentrum Helmholtz-Zentrum Potsdam: [сайт]. URL: <http://www.gfz-potsdam.de/en/section/earths-magnetic-field/data-products-services/kp-index/>
690. IAGA V-MOD Geomagnetic Field Modeling: International Geomagnetic Reference Field: [сайт]. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
691. NOAAs Space Weather Prediction Center: [сайт]. URL: <http://www.swpc.noaa.gov/>