

Рябова Светлана Александровна

**ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ И СИНХРОННЫЕ С
НИМИ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И
МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА ДЛЯ УСЛОВИЙ
СРЕДНИХ ШИРОТ**

Специальность

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Спивак Александр Александрович

Официальные оппоненты: Шалимов Сергей Львович
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, заведующий
лаборатории тектоно-электромагнитных
взаимодействий
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук

Лукишов Борис Глебович
кандидат физико-математических наук,
начальник лаборатории сейсмобезопасности
и геофизических методов контроля
Акционерного общества «Ведущий проектно-
изыскательский и научно-исследовательский
институт промышленной технологии»
(АО «ВНИПИпромтехнологии»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики
Российской академии наук

Защита состоится «11» декабря 2018 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д002.050.01 Федерального бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д.38, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в ИДГ РАН и на сайте idg.chph.ras.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Виноградов Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и практическая значимость. Геофизические поля являются важным и интересным объектом как фундаментальных, так и прикладных исследований. Это связано с тем, что основные геофизические поля отражают структурные свойства, геодинамические, геоэлектрические характеристики локальных участков земной коры, а также режимы геодинамических процессов, протекающих в верхней части земной коры и в приповерхностном слое атмосферы.

Интерес к исследованию вариаций геофизических полей на границе земная кора – атмосфера обусловлен рядом причин. Именно в приповерхностной зоне Земли формируется режим среды обитания, в том числе как отклик на эндогенные и экзогенные воздействия. Здесь же сосредоточена практически вся производственная деятельность человека, причем, с совершенствованием, созданием и внедрением новых, современных технологий (в особенности прецизионных) учет влияния геофизических полей особенно важен. Поскольку на границе земная кора – атмосфера происходит резкое изменение свойств контактирующих сред, и наблюдаются значительные потоки энергии и массы, по временным вариациям геофизических полей, зарегистрированных в приповерхностном слое Земли, можно судить о закономерностях поведения как внешних, так и внутренних геосфер.

Одним из важных геофизических полей для жизнедеятельности человека является магнитное поле Земли. Исследование вариаций геомагнитного поля играет важную роль при оценке достоверности, усовершенствовании и разработке моделей геомагнитного поля, при выявлении локальных особенностей динамики геомагнитного поля, при разработке новых магнитотеллурических методов, при исследовании динамики ионосферы и ее связи с магнитосферой и нижней атмосферой и при исследовании солнечно-земных связей. Для исследования космической погоды и прогноза сильных возмущений, влияющих на технологические системы, важно иметь представление о повторяемости и характерных особенностях возмущений магнитного поля.

Результаты анализа причинно-следственных связей между геомагнитными вариациями, микросейсмическим фоном и уровнем подземных вод важны при решении фундаментальной проблемы, связанной с установлением механизмов преобразования геофизических полей, определением закономерностей формирования среды обитания и эволюции Земли в целом. 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.).

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 диссертационной работы: Установление особенностей геомагнитных вариаций с учетом их возможных связей с микросейсмическим фоном и уровнем подземных вод на Геофизической обсерватории "Михнево".

Основные задачи исследования:

- 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, 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.

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.

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.

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.

Защищаемые положения:

• 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.

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 чтений 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 гг.), 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Обосновывается актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

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

Представлен обзор исследований вариаций магнитного поля, методов применяемых при оценке магнитотеллурических функций и результатов, полученных при исследованиях преобразований и взаимодействий геофизических полей, в частности, при исследовании влияния солнечной и геомагнитной активности на тектонические процессы.

1.1. Вековое изменение магнитного поля Земли. В разделе рассматриваются результаты исследований особенностей вековой вариации геомагнитного поля, аналитические модели для описания вариаций магнитного поля Земли. Несмотря на значительный объем полученных данных, остаются не в полной мере решенные вопросы, связанные с оценкой достоверности 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).

1.2. Основные периодичности вариаций геомагнитного поля (с периодом от нескольких дней до нескольких лет). В разделе приводятся опубликованные результаты исследований периодичностей геомагнитного поля и их возможных источников. 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. В целом, на данный момент не существует однозначного представления об источниках происхождения этих периодичностей. Можно предположить, что периодичности обусловлены некой совокупностью источников, действие которых может различаться в разные временные отрезки. В связи с этим, интересно исследовать временную динамику периодичностей геомагнитного поля. Еще одним важным аспектом периодических вариаций магнитного поля является расщепление спектральных гармоник, которое либо связывают с действием лунно-солнечного прилива, либо с модуляцией большими периодами. В целом же, причины расщепления до конца не ясны.

1.3. Регулярные суточные вариации магнитного поля Земли. В разделе 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.

1.4. Геомагнитная активность и ее связь с солнечной активностью. В разделе представлен обзор индексов, используемых для описания степени возмущенности геомагнитного поля, подробно рассмотрен широко применяемый на практике геомагнитный индекс K . Кроме того, в разделе приведены результаты исследования связи 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.

1.5. Магнитотеллурические передаточные функции и методы их оценки. В разделе 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.

1.6. Влияние солнечной и геомагнитной активности на геодинамические процессы. В разделе 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.

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

2.1. Использованные данные и краткая характеристика района инструментальных наблюдений. В разделе описываются средства регистрации, данные с которых использованы в настоящей работе, и приводится краткое описание района Геофизической обсерватории "Михнево" Института динамики геосфер Российской академии наук. Кроме того, описываются данные с других исследовательских центров, используемые на разных этапах исследования. Геофизическая обсерватория "Михнево" расположена в 85 км к югу от города

Москвы, на юге Московской области, в Приокско-Тerrasном природном заповеднике (координаты: 54,959° с.ш.; 37,766° в.д.). Обсерватория удалена от крупных промышленных объектов, что делает ее особо пригодной для изучения геофизических полей разной природы. Район исследования находится в центральной части Восточно-Европейской платформы и характеризуется наличием глубинной тектонической структуры, которая представлена Нелидово-Рязанской шовной зоной.

2.2. Исследование составляющих временных рядов

Подготовка данных к анализу и их предварительный анализ. Подготовка данных инструментальных наблюдений к обработке заключалась в обнаружении и удалении выбросов (спайков) и заполнении пропусков. В результате ликвидации пропусков формировались эквидистантные ряды данных с нужной дискретизацией. Затем осуществлялся предварительный анализ полученных цифровых рядов, основанный на проверке гипотез нормальности, неслучайности (независимости) и стационарности.

Оценка трендовой составляющей. Для выделения трендовой составляющей использовался сингулярный спектральный анализ (метод "Гусеница") с идентификацией трендовой составляющей методом низких частот.

Оценка периодических составляющих (периодик). Предварительно с целью получения основных периодичностей применялся метод спектрального анализа на основе преобразования Фурье. Поскольку традиционно используемое в этом случае преобразование Фурье не позволяет выделять резкие изменения в нестационарных временных рядах за счет усреднения коэффициентов разложения по всему исследуемому ряду, в настоящей работе с целью изучения динамики периодичностей использовалось непрерывное вейвлет-преобразование. В качестве материнского вейвлета был выбран комплексный вейвлет Морле, обеспечивающий близость формы выбранной функции к форме зарегистрированного непрерывного сигнала и позволяющий разделить фазовые и амплитудные компоненты результатов вейвлет-преобразования. При построении вейвлет-спектров учитывалось, что 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). В настоящей работе анализ скейлинга проводился на основе метода максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования.

Выделение приливной составляющей. Выделение приливных составляющих проводилось с помощью оценки спектров на основе метода параметрической авторегрессии. Параметры авторегрессионной модели оценивались по методу Левинсона-Дурбина, реализующему решение уравнений Юла-Уолкера. Дискриминация близких по периодам приливных волн осуществлялась с привлечением метода выделения гармонических составляющих с помощью узкополосных адаптивных режекторных фильтров.

Амплитудная модуляция. 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.

2.3. Анализ геомагнитных данных

Оценка стационарного индекса магнитной активности K . При вычислении K -индекса использовался метод адаптивного сглаживания, который аккредитован рабочей группой «геофизические индексы» Международной ассоциации геомагнетизма и аэрномии (IAGA) на Венской генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза (IUGG) в 1991 г. и рекомендован для использования в компьютерных программах автоматического вычисления K -индексов.

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, с целью минимизации сезонных вариаций, берется разница между месячными значениями в моменты времени $t + 6$ месяцев и $t - 6$ месяцев.

Исследование суточных вариаций. С целью исследования ежедневной изменчивости суточной вариации для магнитоспокойных дней вычислялись значения ночного времени, т.е. базовые значения составляющей геомагнитного поля (средние значения ночного времени: 23 – 02 ч по местному времени).

2.4. Оценка магнитовариационных параметров

Метод разделения сигнал-шум. При оценке магнитовариационных параметров (магнитный типпер и магнитный тензор) использовался метод разделения сигнал / шум. 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, промышленные помехи), низкий уровень сигнала в "мёртвых" диапазонах.

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. Параметры модели определялись глубиной залегания уровня водоносного безнапорного горизонта, горизонтальные слои соответствовали структурным слоям геологического разреза вблизи скважины и уровень подземных вод менялся в соответствии с данными измерений.

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

Обработка данных магнитометра. На первом этапе при совместном анализе геомагнитных импульсов и сейсмических колебаний осуществлялся визуальный просмотр данных и производился отбор участков записи магнитометра, на которых наблюдалась повышенная магнитная активность (локальный индекс магнитной активности K равный или больше 3). В результате обработки цифровых рядов определялись амплитуды пикообразных геомагнитных вариаций относительно фоновых значений V , которые определялись как среднеквадратическое значение за период 1 – 2 ч, предшествующий анализируемой геомагнитной вариации. При этом использовались значения амплитуды положительного импульса, как разности $V = V_I - V_T$, где V_I и V_T – соответственно максимальный в импульсе и средний за час

перед импульсом модули горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции.

Обработка данных сейсмоприемника. В качестве значений амплитуды наведенных вариаций сейсмического фона ν 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). Выделение наведенных вариаций микросейсмического фона осуществлялось на основе спектрально-временного анализа (СВАН).

2.6. Анализ связей между временными рядами

Построение кривой зависимости. При построении кривой зависимости использовался улучшенный метод наименьших квадратов, разработанный для построения кривой зависимости экспериментальных данных, загрязненных случайной ошибкой.

Корреляционный анализ. Оценка тесноты (силы) связи между двумя рядами проводилась с использованием трех методик: вычисление коэффициента линейной корреляции Пирсона, коэффициентов ранговой корреляции Спирмена и Кендалла. С целью подтверждения статистической значимости корреляционной зависимости между двумя рядами данных использовался метод анализа статистической значимости при помощи суррогатных рядов данных. Для оценки возможного запаздывания в отклике одной величины при изменении другой вычислялась взаимная корреляционная функция и вычислялся взаимный спектр для пары временных рядов.

Причинно-следственный анализ. Для исследования причинно-следственной связи между геофизическими полями использован тест причинности Грейнджера.

Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

3.1. Особенности длиннопериодных геомагнитных вариаций. Анализ результатов регистрации показал, что вариации компонент магнитной индукции на Геофизической обсерватории "Михнево" в период 2008 – 2017 гг. характеризуются наличием трендовой составляющей (рисунок 1а). Трендовая составляющая для горизонтальной 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 вертикальной B_z и горизонтальной B_y компонент геомагнитного поля на протяжении десяти лет имеют практически линейный вид. В период с 2008 г. по 2017 г. вековая вариация геомагнитного поля (долговременный тренд) была положительной, что свидетельствует об увеличении геомагнитного поля в анализируемый период времени.

Сопоставление среднемесячных значений вариаций геомагнитного поля и значений, рассчитанных по модели *IGRF* 12-ого поколения, показало различие между рассчитанными и экспериментальными значениями, при этом ход графиков экспериментальных значений и теоретически рассчитанных схож. Разница между рассчитанными по модели *IGRF* и экспериментальными значениями магнитного поля Земли обусловлена, главным образом, 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 геомагнитного поля (составляет меньше -1000 нТл), определенными по картам аномального магнитного поля Московской области.

Анализ тренда первой производной компонент геомагнитного поля, рассчитанной по среднегодовым значениям и по модели *IGRF* для обсерватории "Михнево" (рисунок 1б) показал, что изменение в наклоне производной (джерк) довольно ясно видно во всех составляющих в 2011 г. и 2014 г.

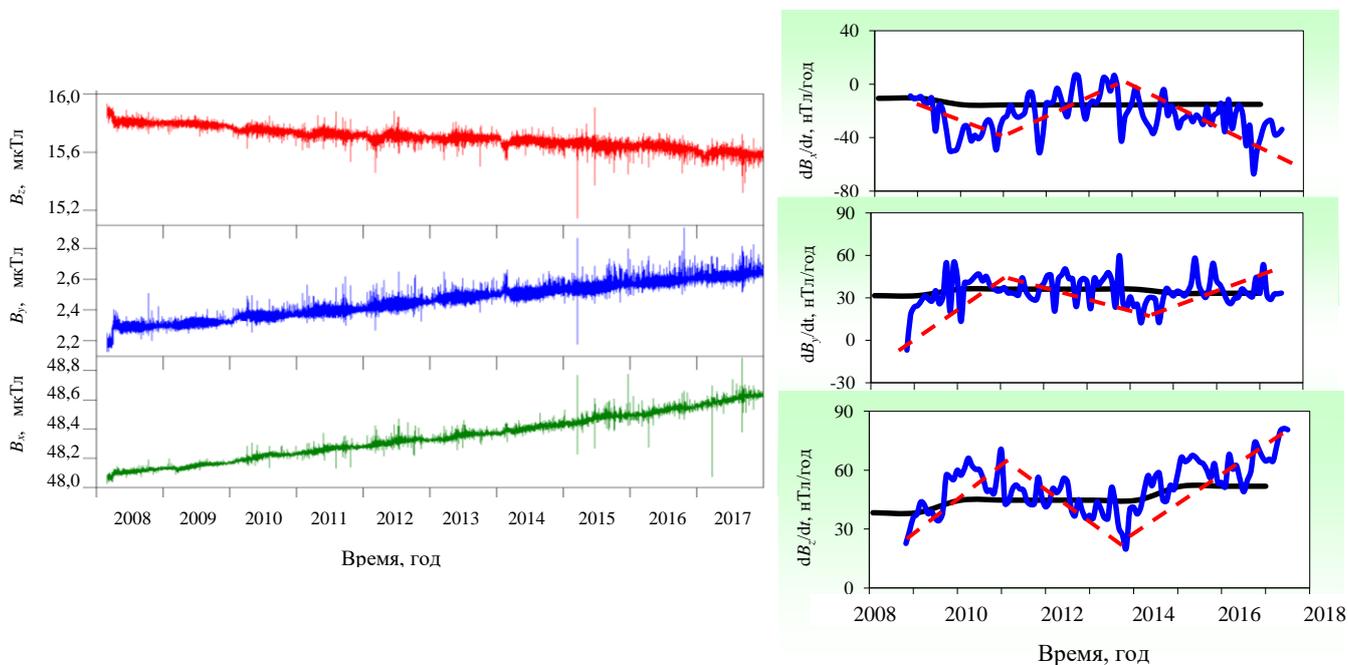


Рисунок 1 – Вариации геомагнитного поля на обсерватории "Михнево" с 26.02.2008 г. по 31.12.2017 г. (слева). Первая производная по времени среднемесячных вариаций геомагнитного поля (синяя линия) и вычисленная по модели *IGRF-12* (черная линия) на обсерватории "Михнево" за период 2008 – 2017 гг (слева). Штриховой красной линией показан наклон производной.

Вариации среднесуточных значений компонент геомагнитного поля характеризуются целым рядом ярко выраженных периодичностей: полугодовая и годовая периодичности, 27-суточная периодичности с гармониками 6, 9, 13 – 14 сут (рисунок 2). Причем, периодичности геомагнитных вариаций на обсерватории "Михнево" имеют спорадический по интенсивности характер: наблюдается эффект чередования периодов увеличения и деградации интенсивности геомагнитных вариаций (перемежаемость) (рисунок 3). Другой особенностью наблюдаемых периодичностей геомагнитных вариаций является их фрактальный характер. Спектральные характеристики вариаций модуля вейвлет-коэффициентов демонстрируют иерархическую структуру геомагнитных вариаций в виде каскадного процесса (рисунок 3). Разветвление локальных максимумов повторяется с увеличением масштаба, свидетельствуя о самоподобии и монофрактальности процесса. Анализ данных с привлечением метода максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования свидетельствует о скейлинговом (близком к монофрактальному в случае суточной вариации) характере геомагнитных вариаций на Геофизической обсерватории "Михнево".

Детальный анализ спектральных гармоник в диапазоне 27 и 14 сут. (рисунок 4) показал наличие гармоник, которое можно объяснить модуляцией 11-летним циклом и периодами год и полгода. Часть периодичностей в этих диапазонах можно объяснить воздействием лунно-солнечного прилива на магнитное поле Земли. Об этом свидетельствует наличие в спектрах гармоник близких к периодам приливных волн: лунной эллиптической волны и лунной деклинационной волны с периодом половины тропического месяца, а также лунно-солнечных приливов с периодами половины и целого синодического месяца.

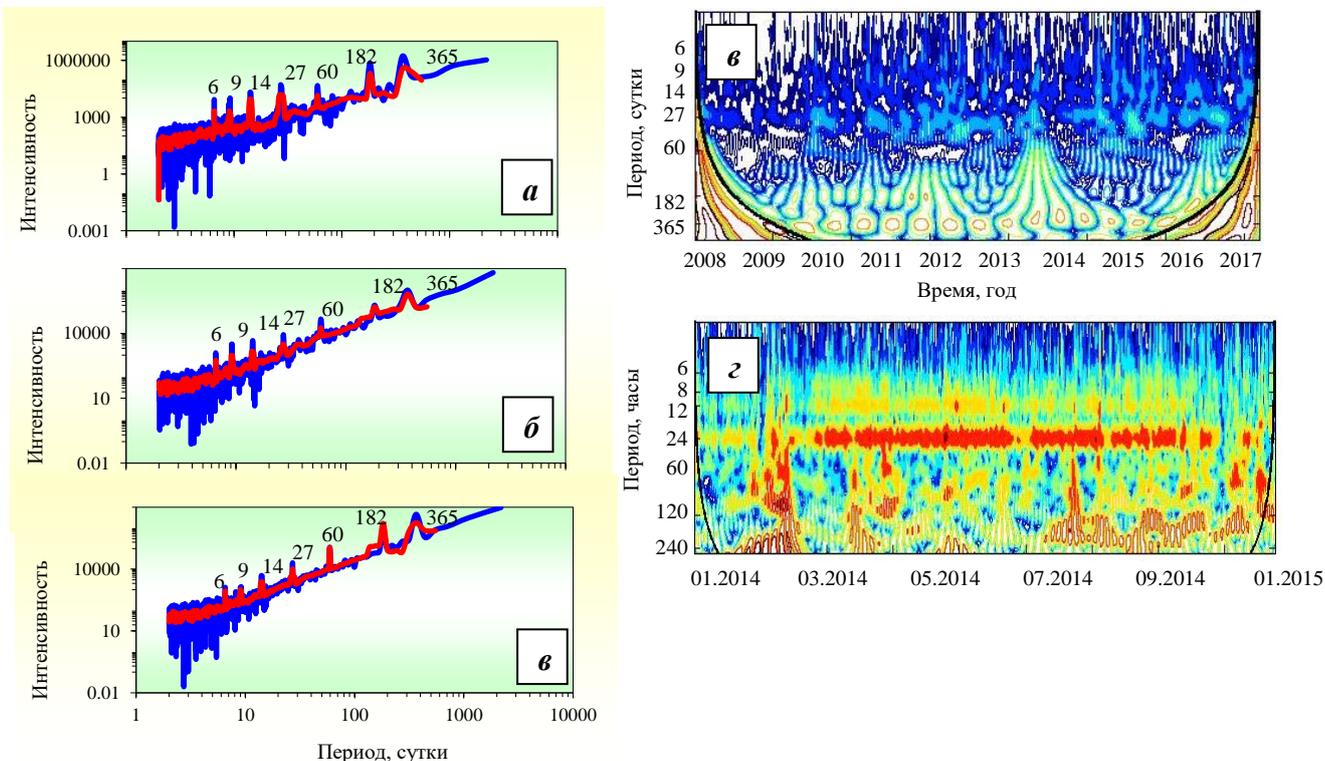


Рисунок 2 – Периодограммы среднесуточных значений геомагнитных вариаций ($a - V_x$, $б - V_y$, $в - V_z$) с 01.03.2008 г по 31.12.2017 г. и результаты вейвлет-преобразований среднесуточных значений геомагнитных вариаций ($г$) и среднечасовых ($з$) значений геомагнитных вариаций (справа) на обсерватории "Михнево"

Установленные для обсерватории "Михнево" особенности длиннопериодных геомагнитных вариаций характерны для средних широт, о чем свидетельствует получение аналогичных результатов в других среднеширотных районах (обсерватории "Бельск", "Борок", "Киев").

3.2. Суточные вариации магнитного поля Земли. Суточные вариации геомагнитного поля на обсерватории "Михнево" в отсутствие возмущений определяются Sq вариацией, связанной с вариациями токовой системы, развивающейся на освещенной Солнцем стороне Земли. Для всех компонент магнитного поля спокойный период завершается во время восхода Солнца, максимум или минимум в зависимости от компоненты наблюдается за 2 – 3 часа до и после кульминации Солнца, и спокойный период начинается во время заката Солнца (рисунок 5). Амплитуда вариаций геомагнитного поля увеличивается, а продолжительность спокойного интервала сокращается летом, что можно объяснить сезонным изменением солнечно-спокойной токовой системы.

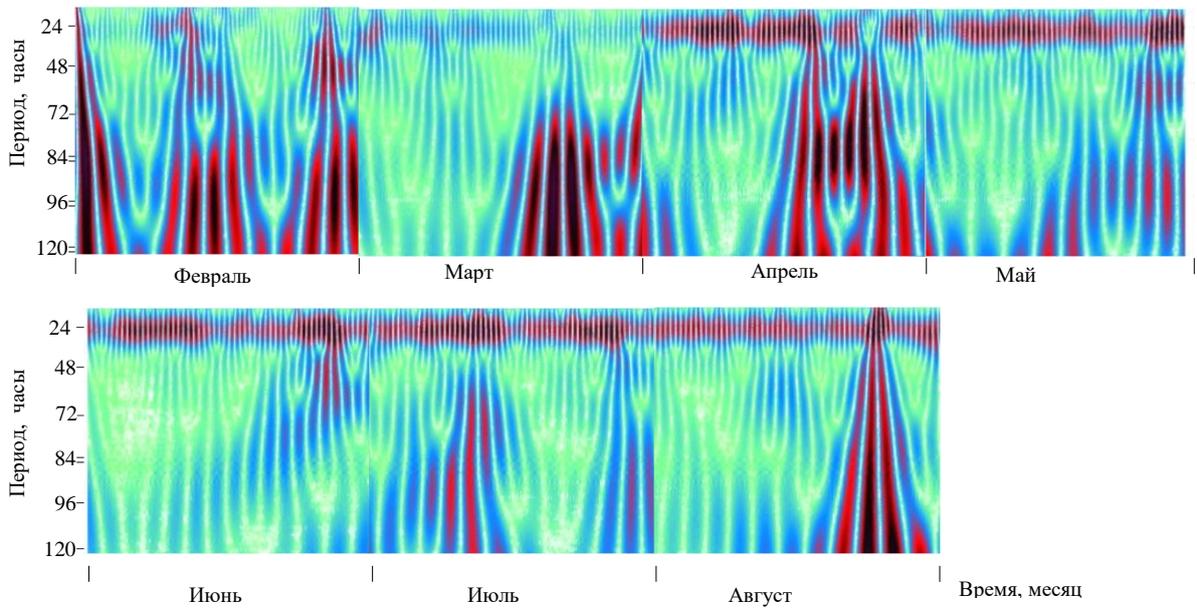


Рисунок 3 – Модуль вейвлет-коэффициентов геомагнитных вариаций (компонента B_x) на обсерватории "Михнево" за период февраль-август 2011 г. в диапазоне 0,1 – 6 сут. в пределах конуса влияния

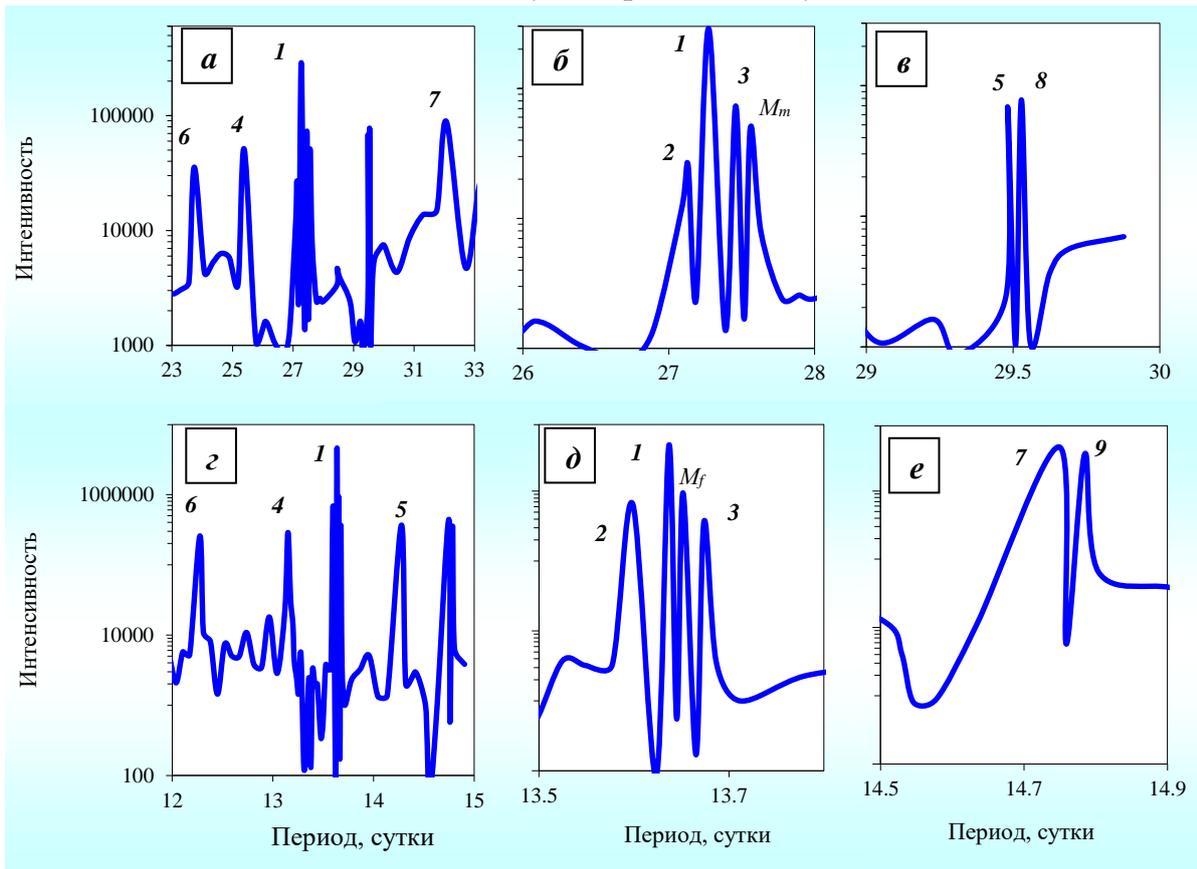


Рисунок 4 – Периодограммы геомагнитных вариаций в области 27 – 33 суток (а), 26 – 28 суток (б), 29 – 30 суток (в), 12 – 15 суток (г), 13,5 – 13,8 суток (д), 14,5 – 14,9 суток (е) на на обсерватории "Михнево". Пики 2 и 3 соответствуют модуляциям периодом 11 лет, пики 4 и 5 – модуляциям периодом 1 год, пики 6 и 7 – модуляциям периодом полгода. Пики 8 и 9 – приливные волны с периодами половины и целого синодического месяца.

Анализ среднечасовых значений компонент геомагнитного поля демонстрирует наличие вариаций с периодами, равными 6, 8, 12 и 24 часам. В магнитоспокойные дни эти периодичности монофрактальны и хорошо выражены (рисунок 1в). В полусуточном и суточном диапазонах расщепление спектральных гармоник также как в диапазоне 27 и 14 сут. обусловлено совокупностью двух факторов: влияние лунно-солнечных приливов (действие сил притяжения Луны и Солнца и термогравитационные приливы) и модуляциями 11-летним циклом и периодами год и полгода, 27 и 14 сут. Аналогичные результаты в околосуточных и полусуточных периодах были получены при привлечении данных вариаций магнитного поля на среднеширотной Геофизической обсерватории "Бельск".

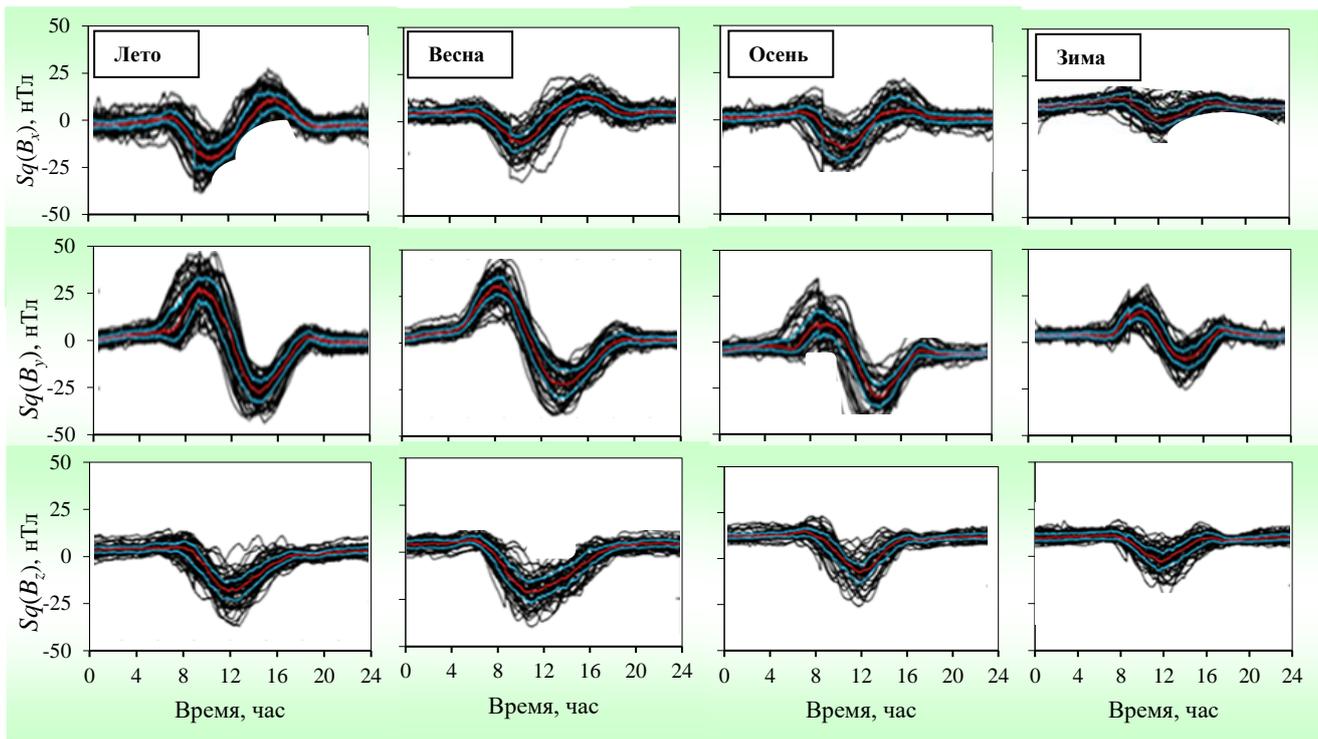


Рисунок 5 – Сезонные вариации суточного хода геомагнитных вариаций в магнитоспокойные дни на обсерватории "Михнево" (по местному времени). Красная линия - медиана, нижняя синяя линия – 1-й квартиль, верхняя синяя линия – 3-й квартиль.

3.3 Особенности геомагнитной активности. Анализ данных показал, сильное отличие по величине трехинтервальных планетарного K_p и станционного K индексов (Геофизическая обсерватория "Михнево"). При исследовании локальной геомагнитной активности с учетом квазилогарифмической нелинейности шкалы вычисления K -индекса такое отличие в геомагнитной активности следует считать значительным. 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. Анализ рассматриваемых в настоящей работе параметров геомагнитной активности (частота геомагнитных возмущений (рисунок 6а), суммарный за сутки индекс K , продолжительность геомагнитных возмущений (рисунок 6б)) показал, что для геомагнитной активности на Геофизической обсерватории "Михнево" характерны 14-, 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.

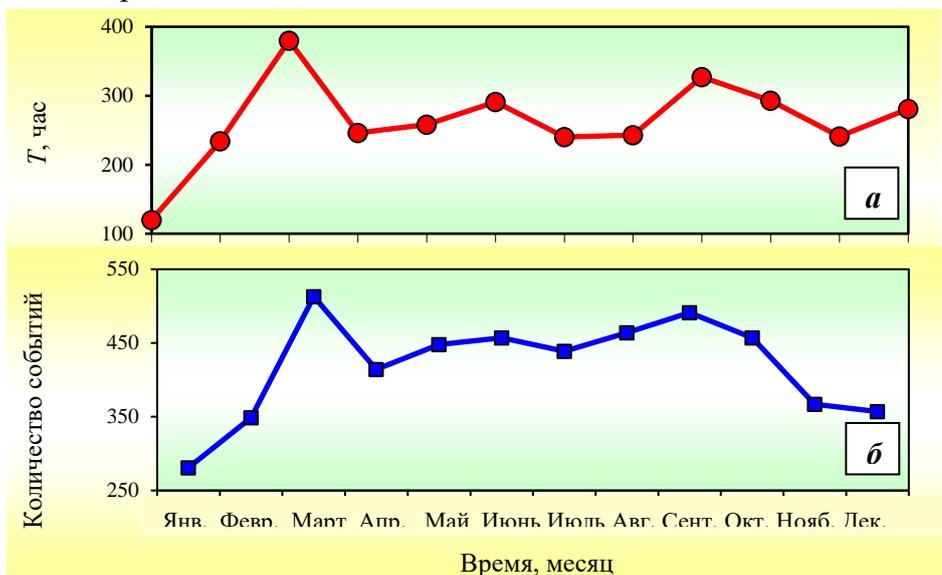


Рисунок 6 – Продолжительность(а) и повторяемость (б) трехчасовых промежутков геомагнитных возмущений ($K \geq 4$) в зависимости от месяца на обсерватории "Михнево" за период 2009 – 2017 гг.

Связь между геомагнитной и солнечной активностью. Результаты сопоставления временных вариаций параметров солнечной активности (индекс $F10,7$, число солнечных пятен) и среднемесячной суммы K -индекса показывают, что максимум геомагнитного K -индекса наблюдается примерно на год позже пика солнечной активности, что подтверждает кросс-корреляционный анализ и результаты теста Грейнджера.

ГЛАВА 4. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

4.1. Особенности магнитовариационных параметров. Анализ показал, что магнитовариационные параметры (магнитный типпер и магнитный тензор) существенно варьируют со временем. При этом были выделены годовая и полугодовая периодичности, а также хорошо выраженные 14, 27 и 60-суточные периодичности.

4.2. Закономерности длиннопериодных изменений режима подземных вод. В качестве характеристики изменения гидрогеологического режима в настоящей работе использовались данные, полученные при измерении уровня подземных вод безнапорного Каширского водоносного горизонта в открытой скважине. Отметим, что для безнапорного горизонта уровень подземных вод в скважине характеризует толщину водонасыщенного слоя горных пород. В этом случае при изменении уровня воды изменяется толщина обводненного слоя горных пород, т.е. слоя, характеризующегося более высокой электрической проводимостью.

Анализ данных показал, что в изменении уровня подземных вод прослеживается плавный сезонный ход: предвесенний спад, весенний подъем, глубокий летний спад и осенний подъем уровней (рисунок 7). Наряду с годовой цикличностью, наблюдаются хорошо выраженные периодичности с периодами $\sim 27,5$, $13,5$ сут. и полугодовая периодичность.

4.3. Совместные вариации магнитного типпера и уровня подземных вод.

Сопоставление оцененных значений магнитуды магнитного типпера и абсолютного уровня подземных вод безнапорного горизонта демонстрирует синхронность их изменений (рисунок 7). Результаты анализа свидетельствуют о практически линейной связи между магнитудой магнитного типпера T и вариациями уровня безнапорного водонасыщенного горизонта h (рисунок 8). С достаточной для практических оценок точностью зависимость $T(h)$ представима в виде:

$$T(h) = -0,0327h + 4,74004. \quad (1)$$

Высокие коэффициенты детерминации и значительное отличие коэффициентов корреляции исходных рядов от коэффициентов корреляции суррогатных рядов свидетельствуют о значимой корреляционной зависимости между изменением уровня подземных вод в открытой скважине и вариацией магнитного типпера.

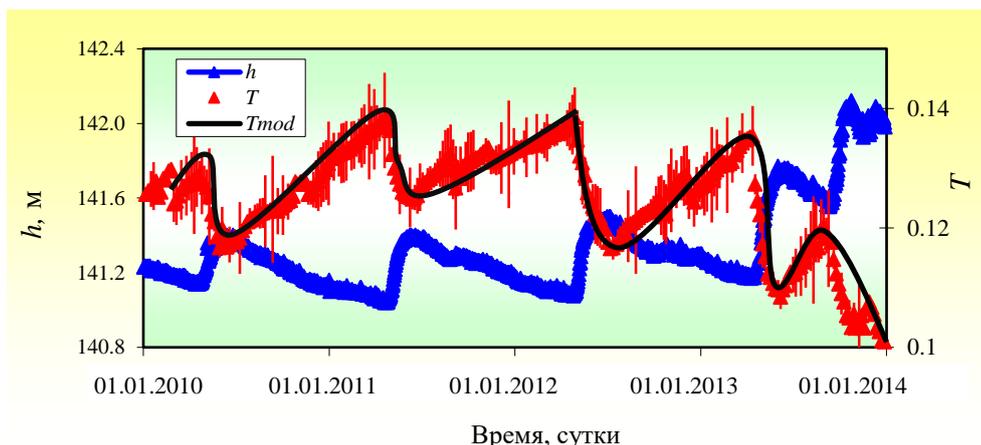


Рисунок 7 – Вариации уровня безнапорного водонасыщенного горизонта и магнитуды магнитного типпера на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

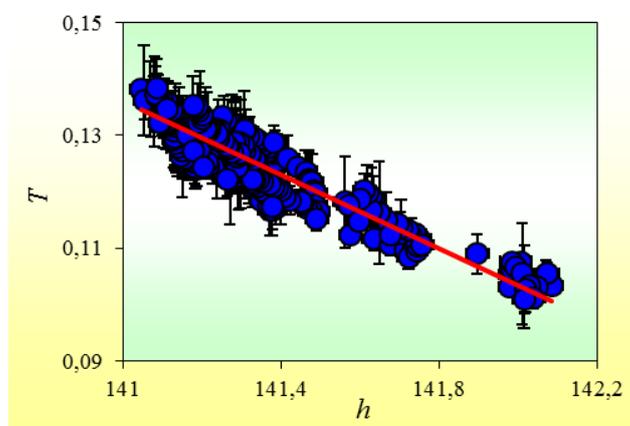


Рисунок 8 – Зависимость между магнитудой магнитного типпера T и уровнем подземных вод h на обсерватории "Михнево" за период 2010 – 2013 гг.

Результаты магнитотеллурического моделирования изменения величины магнитного типпера, обусловленного вариациями уровня подземных вод безнапорного горизонта демонстрируют достаточно хорошее совпадение рассчитанных по модели и по данным регистрации геомагнитного поля значений магнитуды магнитного типпера, что подтверждает гипотезу о зависимости изменения магнитного типпера от вариаций уровня подземных вод.

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

В главе 5 приводятся результаты анализа синхронных вариаций геомагнитного поля импульсного типа и микросейсмического фона на обсерватории "Михнево".

5.1. Некоторые статистические характеристики геомагнитных вариаций импульсного типа. Предварительно было показано, что можно выделить несколько типов импульсных геомагнитных вариаций на Геофизической обсерватории "Михнево": 1) геомагнитные вариации с внезапным началом (*SSC*-события), 2) в виде внезапного импульса, когда локальные геомагнитные вариации не развиваются (*SI*-события), 3) в виде внезапного импульса на фоне сформировавшихся локальных геомагнитных вариаций (*SMI*-событие). Помимо основных перечисленных выделяются и другие типы геомагнитных вариаций: магнитные бури с постепенным началом; магнитные бури с несколькими одиночными импульсами типа внезапного начала; пуг одиночных внезапных импульсов и т.д. Здесь следует отметить, что в настоящей работе наряду с событиями, для которых $K \geq 4$ и которые традиционно рассматриваются как магнитные бури, рассматривались также и внезапные импульсы событий с $K = 3$ (возмущенное состояние геомагнитного поля), амплитуда которых превышала 10 нТл. Это сделано в связи с тем, что диапазоны амплитуд геомагнитных вариаций, характеризующихся разными значениями индекса K , заметно пересекаются. Основное количество геомагнитных вариаций импульсного типа наблюдается на обсерватории "Михнево" в весенний и осенний периоды, в дневное время по местному времени, причем преобладают геомагнитные вариации импульсного типа с амплитудой 20 – 80 нТл и с продолжительностью 40 – 100 мин.

5.2. Особенности микросейсмического фона. Анализ данных сейсмической регистрации, выполненный с целью установления фоновых характеристик микросейсмических колебаний, показал высокую изменчивость амплитудных и спектральных характеристик микросейсмического фона на обсерватории "Михнево" за рассматриваемый период. При этом в разных частотных диапазонах наблюдаются разные периодичности. Длиннопериодные колебания (диапазон 0,1 – 0,5 Гц) характеризуются периодичностями с периодами ~ 14, 27, 45, 60 и 365 сут. В диапазоне частот 6 – 8 Гц наилучшим образом проявляются периодичности с периодами около 12 и 24 час и дополнительно с периодом 7 сут. Одновременно следует отметить наличие двухнедельной и околomesячной периодичностей вариаций фона как в длиннопериодной, так и короткопериодной частях спектра. Существенными факторами возбуждения микросейсмического шума являются атмосферные явления (прохождение атмосферных фронтов, осадки и т.д.), землетрясения, взрывы и другие техногенные источники, это принималось во внимание при исследовании возможного отклика микросейсмического фона на геомагнитные вариации импульсного характера.

5.3. Вариации микросейсмического фона, вызванные действием геомагнитных импульсов. Результаты обработки и анализ данных показали, что во время импульсных вариаций магнитного поля *SSC* и *SI* типа в большинстве случаев наблюдаются повышенные вариации сейсмического фона. Выполненный спектральный анализ свидетельствует о том, что вызванные вариации сейсмического 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 характер указанных вариаций имеет сложную морфологию и зависит от конкретного геомагнитного возмущения.

Результаты инструментальных наблюдений, несмотря на значительный разброс данных, демонстрируют в целом увеличение вариаций амплитуды сейсмического фона ν с увеличением амплитуды геомагнитных импульсов B (рисунок 9). Аналитически полученная зависимость $\nu(B)$ с достаточной для практических оценок точностью аппроксимируется зависимостью, в которой B выражено в нТл:

$$\nu = 0.35 \left\{ 1 - e^{-0.007B} \right\} \text{ мкм/с}, \quad (2)$$

При этом, существенно, что в диапазоне от 15 до 100 нТл величина наведенных вариаций микросейсмического поля растет практически линейно с ростом амплитуды магнитного импульса, а затем, по мере увеличения амплитуды геомагнитных вариаций, зависимость "выполаживается". Это является свидетельством ограниченных возможностей среды в формировании механического отклика на геомагнитные возмущения: наступает насыщение. О статистически значимой корреляции свидетельствуют высокие коэффициенты детерминации и значительное отличие коэффициентов корреляции исходных от коэффициентов корреляции суррогатных рядов.

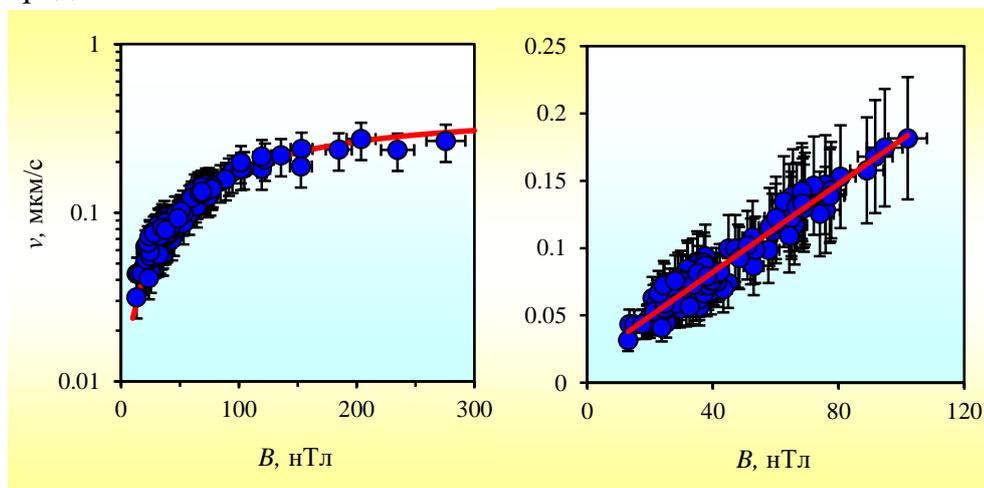


Рисунок 9 – Зависимость между амплитудой вариаций сейсмического фона ν , наведенных в период геомагнитных вариаций и амплитудой горизонтальной составляющей B для всех рассматриваемых событий (а) и для событий с низкой амплитудой горизонтальной составляющей B (б)

Применение методов статистической обработки данных демонстрирует, что с большой статической значимостью именно возмущение геомагнитного поля влечет за собой изменение микросейсмического фона, причем с некоторым запаздыванием.

Учитывая высокую степень обводненности района исследований, можно ожидать, что наличие флюидов играет важную роль в процессе преобразования

электромагнитной энергии в энергию механических колебаний. Анализ показал, что после геомагнитного импульса в поведении модуля магнитного типпера отмечаются "скачкообразные" изменения. Это свидетельствует о том, что при резком и значительном по амплитуде изменении магнитного поля с небольшой задержкой по времени происходит изменение величины наведенных электрических токов. Отмеченное "выполаживание" зависимости можно объяснить тем, что наведенные в среде электрические токи достигают максимума, 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). 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 микросейсмических возмущений, которые рассматриваются в диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом:

- 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. В вековой вариации геомагнитного поля на основе данных ряда обсерваторий идентифицированы джерки в 2011 г. и 2014 г. Периодические вариации геомагнитного поля в условиях средних широт отличаются спорадическим по интенсивности и скейлинговым характером.

- В диапазонах 13,5 и 27 суток, околосуточном и полусуточном диапазонах выделены гармоники, как соответствующие лунно-солнечным приливным волнам, так и вызванные 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.

- 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.

- Во время импульсных вариаций магнитного поля *SSC* и *SI* типа в большинстве случаев наблюдаются с некоторым запаздыванием повышенные вариации сейсмического фона в частотном диапазоне 0,01 – 0,1 Гц. Установлена количественная зависимость между амплитудой геомагнитного импульса и амплитудой вызванных вариаций сейсмического фона.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. Отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации. // Доклады академии наук. 2012. Т. 444. № 3. С. 304-308. (Adushkin V.V., Ryabova S.A., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Response of the seismic background to geomagnetic variations // Doklady Earth Sciences. 2012. Vol. 444. Part 1. pp. 642-646.)
2. Адушкин В.В., Спивак А.А., Горбунова Э.М., Рябова С.А., Харламов В.А. Синхронные вариации магнитного поля Земли и уровня подземных вод. // Доклады академии наук. 2013. Т. 449. № 5. С. 579-581. (Adushkin V.V., Gorbunova E.M., Ryabova S.A., Kharlamov V.A. Synchronous variations in Earth's magnetic field and groundwater level. // Doklady Earth Sciences. 2013. Vol. 449. Part 2. pp. 427-429.)
3. Рябова С.А., Спивак А.А. Особенности геомагнитных вариаций на средних широтах Восточно-Европейской платформы. // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57. № 2. С. 304-308. (Riabova S.A., Spivak A.A. Geomagnetic variation peculiarities at middle latitudes of the East European Platform. // Geomagnetism and Aeronomy. 2017. Vol. 57. No. 2. pp 199–206.)
4. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Эффекты лунно-солнечного прилива в земной коре и атмосфере. // Физика Земли. 2017. № 4. С. 76-92. (Adushkin V.V., Riabova S.A., Spivak A.A. Lunar–solar tide effects in the Earth's crust and atmosphere. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. Vol. 53. No. 4. pp. 565–580.)
5. Адушкин В.В., Спивак А.А., Рябова С.А., Харламов В.А. Приливные эффекты в геомагнитных вариациях. // Доклады академии наук. 2017. Т. 474. № 2. С. 226–229. (Adushkin V.V., Spivak A.A., Riabova S.A., Kharlamov V.A. Tidal effects in geomagnetic variations. // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 474. Part 1. pp. 579–582.)
6. Рябова С.А., Спивак А.А. Возмущение сейсмического фона геомагнитными импульсами. // Геофизические исследования. 2017. Т.18. № 2. С. 65-76.
7. Рябова С.А., Спивак А.А. Вариации K -индекса геомагнитной активности в Московском регионе // Геофизические процессы и биосфера. 2017. Т. 16, № 4. С. 28–36.

Основные публикации в других изданиях

1. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. Синхронные вариации геомагнитного и микросейсмического полей на ГФО «Михнево» ИДГ РАН. // Динамические процессы в геосферах. Вып. 3. М.: ГЕОС, 2012. С. 84-91.
2. Адушкин В.В., Горбунова Э.М., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. Особенности геомагнитных вариаций на ГФО «Михнево» ИДГ РАН. // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4. М.: ГЕОС, 2013. С. 183-192.
3. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. О возможном влиянии геомагнитных вариаций на сейсмический фон. // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2013. С. 208-219.
4. Рябова С.А., Спивак А.А. О возможной связи длиннопериодных геомагнитных вариаций с гидрогеологическим режимом на ГФО «Михнево». // Триггерные эффекты в геосистемах. Вып. 6. М.: ГЕОС, 2014. С. 137-142.

5. Спивак А.А., Рябова С.А., Горбунова Э.М. Геомагнитные вариации на земной поверхности и их связь с динамикой подземных вод. // Вестник НЯЦ РК. № 4(64). 2015. С. 98-106.
6. Рябова С.А., Спивак А.А. Некоторые статистические характеристики геомагнитной активности на геофизической обсерватории «Михнево». // Динамические процессы в геосферах. Вып. 8. М.: ГЕОС, 2016. С. 114-121.
7. Рябова С.А.. Магнитовариационные параметры на среднеширотной Геофизической обсерватории «Михнево». // Динамические процессы в геосферах. Вып. 8. М.: ГЕОС, 2016. С. 121-129.
8. Рябова С.А., Спивак А.А. Вариации сейсмического фона в периоды геомагнитных вариаций. // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Восьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: УрОРАН, 2015. С. 282- 287.
9. Рябова С.А., Спивак А.А., Горбунова Э.М. Вариации магнитного типпера на земной поверхности при изменении уровня подземных вод. // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Восьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. - Екатеринбург: УрОРАН, 2015. С. 288-292.
10. Riabova S.A., Loktev D.N., Spivak A.A. Geomagnetic variations due to change in groundwater level. // GeoBaikal 2016. Extended Abstracts. <http://earthdoc.eage.org/publicationdetails/?publication=86403>
11. Riabova S.A. Features of Magnetotelluric Transfer Functions for the Central Part of East European Platform // 19th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development «Geomodel 2017». Extended Abstracts. www.earthdoc.org/publication/download/?publication=43821
12. Рябова С.А. Исследование возмущения микросейсмического фона геомагнитными импульсами на среднеширотной обсерватории «Михнево». // Вестник НЯЦ РК. № 2(74). 2018. С. 36-43.
13. Рябова С.А. Геомагнитная активность на Геофизической обсерватории «Михнево» Института динамики геосфер РАН// Сборник IV Школы-конференции «Гординские чтения». М.: ИФЗ РАН. С. 157-160.
14. Riabova S.A. Calculation of magnetotelluric function and their variations due to changes in the groundwater lever // 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference Proceedings. Vol. 18. P. 119-126.
15. Riabova S.A. Features of Geomagnetic Field Variations Mid-latitude Observatories in Range of Period and Half-period of Carrington // 19th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development «Geomodel 2018». Extended Abstracts. www.earthdoc.org/publication/download/?publication=94171