Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ КОЗЬМЫ МИНИНА»

УДК 550.385.4
№ госрегистрации
Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
Ректор НГПУ им.К.Минина,
профессор
_____ А.А. Федоров
«__» _____ 2018 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Задание № 5.5898.2017/БЧ на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания на 2017-2019 годы

по теме:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРИЧИНЫ ВЫСОКОШИРОТНЫХ СУББУРЬ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИХ ПРОГНОЗА
(промежуточный, этап 2017 г.)

Номер темы:

Руководитель НИР _____ Н.А. Бархатов
подпись, дата

Нормоконтролер _____ ФИО
подпись, дата

Нижний Новгород, 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, соисполнитель,
доктор физ.-мат. наук, профессор _____ Н.А. Бархатов
подпись, дата

соисполнитель темы,
кандидат физ.-мат. наук, доцент _____ С.Е. Ревунов
подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 25 с., 10 рис., 18 источ., 1 прил.

Ключевые слова: СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР, МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ПЛАЗМЕННЫЙ ПОТОК, МАГНИТОСФЕРА, МАГНИТНАЯ БУРЯ, ИНДЕКСЫ ПОЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОДЖЕТОВ, ИОНОСФЕРА, ПЛАЗМЕННЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ, ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ПРОГНОЗ

В соответствии с требованиями задания на данную НИР «Фундаментальные причины высокоширотных суббурь и разработка методов их прогноза» объектом исследования является выявление причин, благодаря которым проявления солнечной активности в виде возмущений солнечного ветра приводят к интенсификации высокоширотных магнитных возмущений. Основные цели первого этапа выполнения НИР заключались в установлении количественной связи параметров солнечного ветра (ПСВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), с высокоширотными процессами, описываемыми индексами геомагнитной активности. Предполагалось также выполнить оценку воздействия интегральной кинетической энергии потока солнечного ветра, инжектированной в магнитосферу, на динамику индекса AL полярных электроджетов.

Заявленные цели достигнуты. Разработан нейросетевой алгоритм восстановления динамики AL индекса по параметрам плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Для описания процесса формирования суббури наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра использован интегральный параметр, характеризующий кинетическую энергию потока солнечного ветра, инжектированную в магнитосферу. Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на численных нейросетевых экспериментах по восстановлению динамики AL индекса по ПСВ и ММП в периоды развития суббурь. Обнаружено явление синхронизации ночной ионосферной и геомагнитной возмущенности на средних широтах в диапазоне периодов 35 - 50 минут. Анализ ПСВ и значений индекса AL показал, что это явление связано с возмущенностью Bz компоненты ММП и происходит в условиях развития суббури.

Выполненные исследования позволили разработать методику краткосрочного прогнозирования суббури при использовании онлайн данных патрульного космического аппарата. Соответственно, выводы выполненной работы применимы для оценки негативного воздействия солнечной активности на коммуникации наземного базирования в высоких широтах.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение 6

2. Вычислительный инструмент для успешного восстановления динамики AL индекса и его краткосрочного прогнозирования 8

2.1. Связь индексов магнитной активности с комплексом явлений, наблюдаемых в магнитосфере и атмосфере Земли 8

2.2. Нейросетевые результаты численных экспериментов по восстановлению динамики al индекса 10

2.3. Результаты по созданию вычислительного инструмента успешного восстановления динамики AL индекса или его краткосрочного прогнозирования при использовании онлайн данных патрульного космического аппарата 17

3. Явления ионосферной и геомагнитной возмущенности 18

3.1. Данные использованные для исследования 19

3.2. Обнаружение магнитозвуковых возмущений в спокойной ночной ионосфере 21

3.3. Пространственный анализ распределения рассматриваемых МЗ волн 25

3.4. Возможные причины МЗ возмущенности ночной ионосферы 28

3.5. Условия синхронизации ионосферной и геомагнитной возмущенности в классе Pi3 пульсаций на средних широт в местное ночное время 32

Список использованных источников 34

Приложение. Список публикаций, выполненных в рамках проекта 36

1. Введение

Первый этап НИР «Фундаментальные причины высокоширотных суббурь и разработка методов их прогноза» посвящен установлению фундаментальных закономерностей влияния возмущений солнечного ветра на интенсификацию высокоширотных магнитных возмущений.

Конкретными научными целями первого этапа научно-исследовательской работы являлось выявление причин, благодаря которым проявления солнечной активности в виде геоэффективных плазменных потоков приводят к усилению высокоширотных магнитных и плазменных магнитосферных возмущений. Прикладной целью проекта является создание надежного нейросетевого прогностического инструмента для восстановления характеристик высокоширотной активности и, особенно, динамики AL-индекса.

В рамках работ по выполнению проекта разработан алгоритм восстановления динамики AL индекса по параметрам плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Для описания процесса формирования суббури наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра использован интегральный параметр в виде кумулятивной суммы ∑[N*V2]. Алгоритм включен в рамки, созданной для восстановления AL индекса искусственной нейронной сети (ИНС) типа Элмана, содержащей дополнительный слой нейронов, обеспечивающий «внутреннюю память» о предыстории восстанавливаемого динамического процесса. Для обучения ИНС использованы данные 70 временных интервалов продолжительностью 8 часов, включающих в себя периоды изолированных магнитосферных суббурь. Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на численных нейросетевых экспериментах по восстановлению динамики AL индекса по параметрам солнечного ветра и ММП в периоды развития суббурь. Результаты этой части исследований опубликованы в работах [1-5, 7, 8, 10, 11] (см. Приложение).

Обнаружено явление синхронной ночной ионосферной и геомагнитной возмущенности в УНЧ диапазоне с периодами 35 - 50 минут на средних широтах в глобально магнитоспокойное время. Сопоставление динамических спектров и вейвлет картин изучаемой возмущенности показало совпадающие спектральные особенности одновременных возмущений критической частоты слоя F2 и H, D, Z компонент геомагнитного поля. Принадлежность рассматриваемых возмущений к классу быстрых магнитозвуковых волн установлена изучением спектральных особенностей критической частоты слоя F2 над средними широтами и возмущений H и D компонент геомагнитного поля на магнитных станциях, отличных по долготе и широте. Анализ параметров

солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и значений аврорального индекса AL в рассматриваемый временной интервал показал, что изучаемое событие связано с возмущенностью Bz компоненты межпланетного магнитного поля и происходит в условиях развития суббури. Результаты этой части исследований опубликованы в работах [6, 9, 12-14] (см. Приложение).

Заявленные цели первого этапа исследований достигнуты применением специально разработанных методов, основанных на корреляционных и спектральных подходах, включая вейвлет скелетонный анализ данных. Все результаты, полученные при выполнении второго этапа исследований, доложены на научных конференциях и опубликованы в рецензируемой печати. Список публикаций приведен в Приложении к научно-техническому отчету.

2. Вычислительный инструмент для успешного восстановления динамики AL индекса и его краткосрочного прогнозирования

2.1. Связь индексов магнитной активности с комплексом явлений, наблюдаемых в магнитосфере и атмосфере Земли

Индексы авроральной активности AU, AL, AE, введенные в геофизику Davis and Sigiura [1966], хотя и обладают определенными недостатками [Li et al., 2007], до настоящего времени широко используются для мониторинга геомагнитной активности в высоких широтах. Индекс AU отражает интенсивность восточной электроструи, в то время как индекс AL определяется интенсивностью западной электроструи. Существует множество регрессионных соотношений, связывающих индексы магнитной активности с широким комплексом явлений, наблюдаемых в магнитосфере и атмосфере Земли. Эти взаимосвязи и определяют важность мониторинга и прогнозирования геомагнитной активности для исследований в различных областях солнечно-земной физики. Наиболее драматические явления в магнитосфере и высокоширотной ионосфере происходят в периоды магнитосферных суббурь, чувствительным индикатором которой является временной ход и величина AL индекса.

Полное понимание механизмов генерации суббури еще впереди, но хорошо известно, что началом активной фазы суббури является взрывной переход накопленной потенциальной энергии искаженного магнитного поля полярной магнитосферы в кинетическую энергию заряженных частиц, заполняющих кольцевой ток и плазменный слой магнитосферы и ионизующих высокоширотную атмосферу. Накопление энергии в магнитосфере, происходящее в период подготовительной фазы суббури [McPherron, 1970], обеспечивается усилением крупномасштабного западного электрического поля конвекции поперек хвоста магнитосферы.

Важной задачей современной гелиогеофизики является прогнозирование геомагнитных возмущений, опирающееся на данные патрульных космических аппаратов, находящихся за пределами магнитосферной ударной волны. Прогнозирование AL индекса осуществляется различными методами с использованием, как динамических систем, так и искусственного интеллекта. Основу прогнозирования составляет тесная связь состояния магнитосферы с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП). Краткий обзор различных методов и моделей представлен в работе [Li et al., 2007].

Моделирование физических процессов с применением технологий искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяет для каждой конкретной задачи учесть не только многокритериальные причинно-следственные связи, но и принять во внимание предысторию происходящих процессов. В процессе настройки ИНС циклически решаются однокритериальные задачи оптимизации [*Хайкин, 2006*]. Структура любой нейросети может быть адаптирована к задаче путем включения дополнительных нейронов, если исходная нейросеть не способна обеспечить решение задачи с нужной точностью или из нейросети могут быть исключены лишние нейроны и связи между ними, если исходная нейросеть избыточна для решения задачи. Нейросеть может сама выделить наиболее информативные для задачи входные сигналы, отбросить неинформативные, шумовые сигналы и в итоге повысить надежность решения. При этом нейронная сеть учитывает ранее сформированные навыки, ускоряя, таким образом, свое дообучение.

Определенные успехи в конструировании и прогнозировании AL индекса с использованием ИНС были достигнуты в работах [Hernandez et al., 1993; Weigel et al., 1999, 2003; Valach et al., 2014 и других]. Так, в работе [Hernandez et al., 1993] использовались нейронные сети для прогнозирования AL индекса с 15 мин разрешением на основе данных по VB_s и AL, где V – направленная к Земле компонента скорости солнечного ветра, а B_s – южная компонента ММП. В работе [Weigel et al., 1999, 2003] были использованы те же данные, что и в предыдущем исследовании, но эти авторы создали новую архитектуру ИНС с различными ветвями, учитывающими уровень магнитной активности. В работах [Бархатов и др., 2003; Бархатов и др., 2004] предложен нейросетевой способ восстановления классических индексов авроральных электроджетов по современным индексам, рассчитанным на основе геомагнитных данных полученных на сокращенном количестве обсерваторий. В настоящее время на сайте (http://spacelab.mininuniver.ru/?page_id=81) функционирует нейросетевой интернет-сервис восстановления и публикации классических индексов по ограниченным данным. Такая задача возникает в связи с тем, что в последнее десятилетие часть обсерваторий из списка [Davis and Sugiura, 1966], перестала регулярно поставлять данные для расчета индексов AE(AL, AU).

Процесс накопления энергии возможен только при условии непрерывного поступления в магнитосферу кинетической энергии частиц ($N*V^2$) солнечного ветра на интервале подготовительной фазы суббури (N – плотность, а V - скорость солнечного ветра). Постепенное накопление энергии невозможно учесть на основе мгновенных значений (Bz, N, V), поэтому для описания процесса формирования суббури в настоящей

работе нами предлагается использование интегрального параметра в виде кумулятивной суммы $\sum[N*V^2]$ наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра. Алгоритм описания процесса формирования суббури реализован с помощью инструмента в виде ИНС типа Элмана путем восстановления AL индекса с использованием динамики вводимого нами интегрального параметра. Применение интегрального параметра на входе ИНС позволяет имитировать структуру и интеллектуальные свойства биологической нервной системы, поскольку таким способом обеспечивается дополнительная реализация памяти о предыстории моделируемого процесса.

2.2. Нейросетевые результаты численных экспериментов по восстановлению динамики AL индекса

Эффективность предлагаемого здесь подхода продемонстрирована на численных нейросетевых экспериментах по восстановлению динамики AL-индекса по параметрам солнечного ветра и ММП в периоды развития суббурь. В настоящем исследовании применена нейросеть Элмана, содержащая дополнительный слой нейронов (контекстные нейроны), обеспечивающий «внутреннюю память» о предыстории восстанавливаемого динамического процесса [*Бархатов и Ревунов, 2010*]. Она является рекуррентной ИНС с обратным распространением ошибки и включенной петлей обратной связи, исходящей из скрытого слоя (см. рис. 1.1). Большинство решаемых прогностических задач или задач по восстановлению рядов данных доводятся до конечного результата благодаря использованию именно таких сетей [*Barkhatov et al., 2004*].

В качестве входных последовательностей нейросетевой модели, использованы два параметра – Bz компонента ММП и интегральный параметр $\sum[N*V^2]$, учитывающий предысторию процесса накачки кинетической энергии в магнитосферу в течение 2-3 часов в рамках 60 минутных окон. Единственный выходной нейрон генерирует последовательность значений AL-индекса.

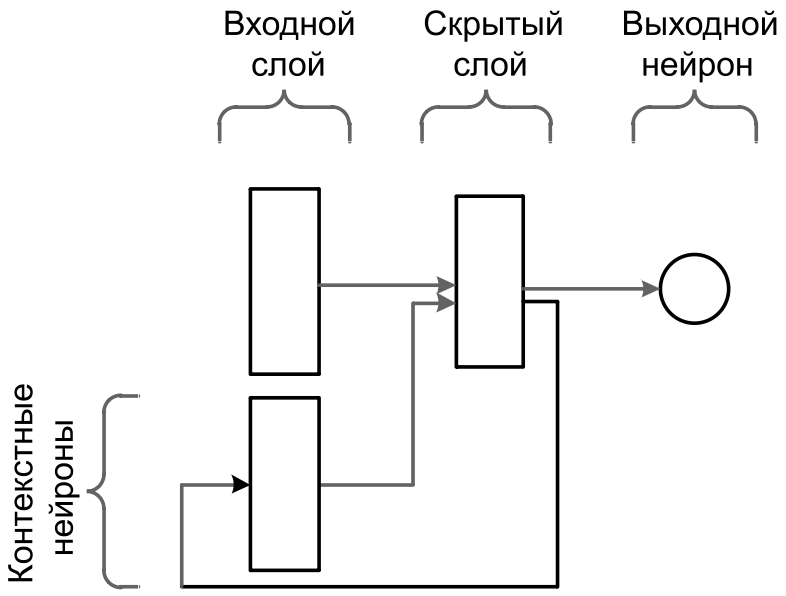

Рис. 1.1. Применяемая архитектура ИНС Элмана.

Объективная оценка качества восстановления AL-индекса выполнялась путем вычисления классического коэффициента корреляции R и эффективности восстановления PE между реальными (целевыми) и сгенерированными нейронной сетью значениями. Эффективность восстановления PE вычислялась по формуле [*Barkhatov et al., 2004*]:

$$PE = \left(1 - \frac{\sum_{\mu=1}^{N} \left(T^{\mu} - O^{\mu} \right)^2}{\sum_{\mu=1}^{N} \left(T^{\mu} - \langle T \rangle \right)^2} \right) \cdot 100\%, \quad \mu = 1, 2, \ldots N,$$

где T^{μ} – целевое (реально зарегистрированное) значение для сопоставления с выходом для μ-го примера во входной последовательности, O^{μ} – значение μ-го выхода ИНС для μ-го примера входной последовательности, $\langle T \rangle$ – среднее по всем целевым значениям выхода ИНС, N – число точек целевого процесса. Таким образом, под эффективностью восстановления понимается единица, уменьшенная на величину средней относительной вариации, которая в свою очередь является отношением среднеквадратичной ошибки к дисперсии целевого процесса.

Численные эксперименты выполнялись на 1-минутных данных AL, Bz, N, V, полученных с узла CDAWeb (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/) в интервалы магнитосферных суббурь различной интенсивности, зарегистрированных по показаниям AL индекса в в периоды с ноября по январь 1995-2013 гг. Условия отбора событий следующие: (1) временной интервал от предыдущего возмущения не менее 3-х часов; (2) диапазон

амплитуд индекса AL должен соответствовать критерию 250 nT < |AL| < 1500 nT; (3) длительность суббури < 3 часов; (4) окончание возмущения – это время UT, когда величина |AL| < 0.2 max|AL|. Отбор суббурь по критериям 1-3 проводился визуальным просмотром суточных вариаций AL индекса. Для определения времени начала фазы развития суббурь (*To*) использовался специально разработанный для этих целей автоматический алгоритм. Дополнительным признаком появления суббури являлось наличие соответствующих вариаций в индексах магнитной активности SYM/H(D) или ASY/H(D). Более детально критерии отбора изолированных суббурь и их характеристики изложены в работе [Воробьев и др. 2016].

В первой группе численных экспериментов продемонстрирована важность учета интегрального параметра $\sum[N*V^2]$. Для этого использованы данные на временных интервалах продолжительностью 8 часов, включающих в себя периоды 74 изолированных магнитосферных суббурь. При этом обучающий массив включал 70 событий, а тестовый массив содержал 4 события. С целью минимизации эффекта «запоминания» последнего обучающего образца предлагаемые пакеты данных нормировались и подавались на вход ИНС в случайном порядке. Таким образом, тестирование качества настройки ИНС всегда выполнялось на пакетах данных, исключенных из обучающего массива. На рис. 1.2а, 1.3а, 1.4а представлены примеры восстановления индекса AL по мгновенным значениям, а на рис. 1.2б, 1.3б, 1.4б индекс AL восстановлен с учетом интегрального параметра. На каждом графике приведены значения линейных коэффициентов корреляции (R) между величинами официального и восстановленного индексов AL. Для объективной оценки качества работы ИНС по восстановлению AL была вычислена и эффективность восстановления (PE). Демонстрируемые графики отражают зависимость значений индекса AL (нТл) от времени их регистрации (час, мин UT). Серая линия отвечает реально зарегистрированным данным, черная линия соответствует значениям, сгенерированным нейросетью.

а б

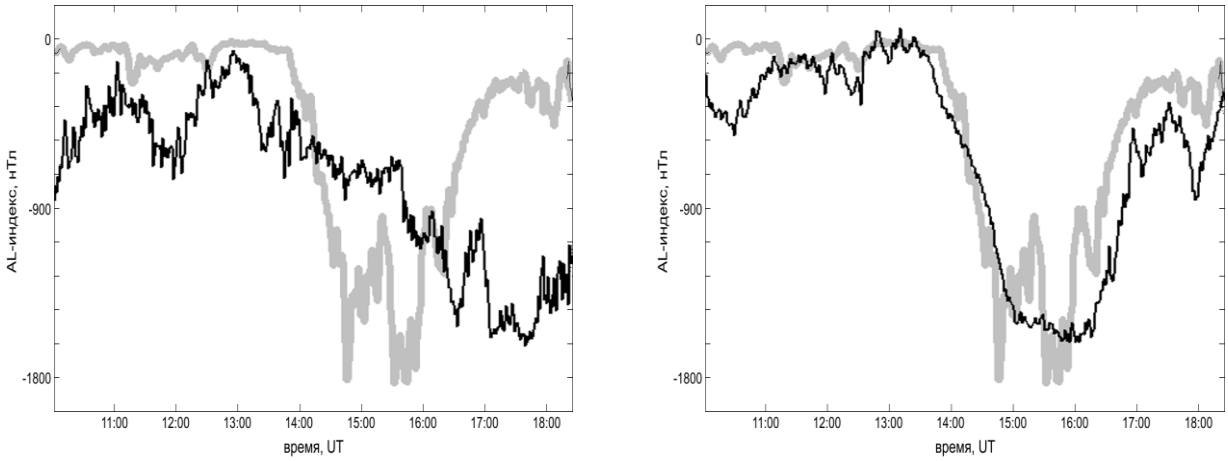

Рис. 1.2. Результат восстановления индекса AL во время суббури 07.01.2005: (а) - без интегрального параметра по мгновенным значениям (R=0.27, PE=0%), (б) - с применением интегрального параметра (R=0.92, PE=74%). Серая линия – реальные данные, черная линия – ответ ИНС.

а б

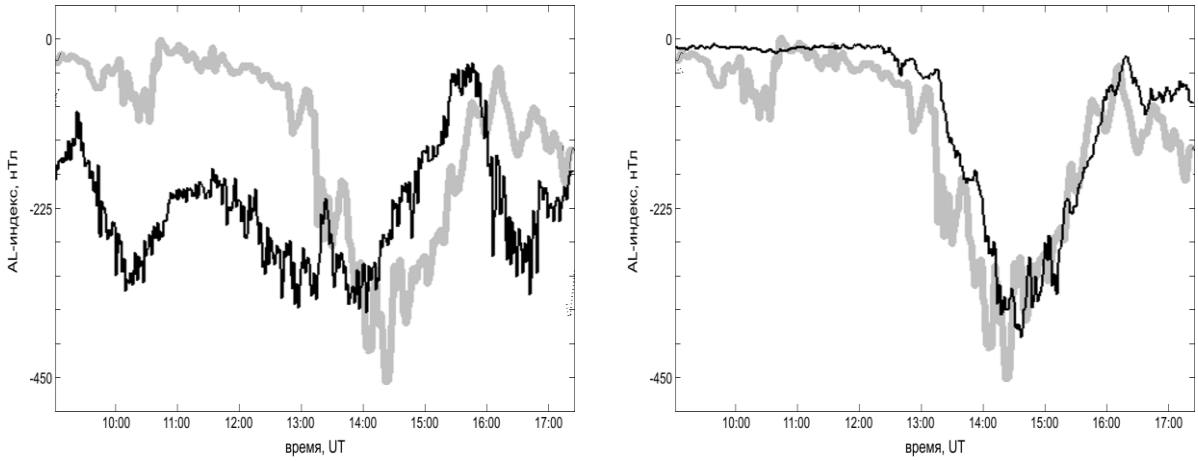

Рис. 1.3. Результат восстановления индекса AL во время суббури 29.11.2007: (а) - без интегрального параметра по мгновенным значениям (R=0.12, PE=0%), (б) - с применением интегрального параметра (R=0.92, PE=75%). Серая линия – реальные данные, черная линия – ответ ИНС.

а б

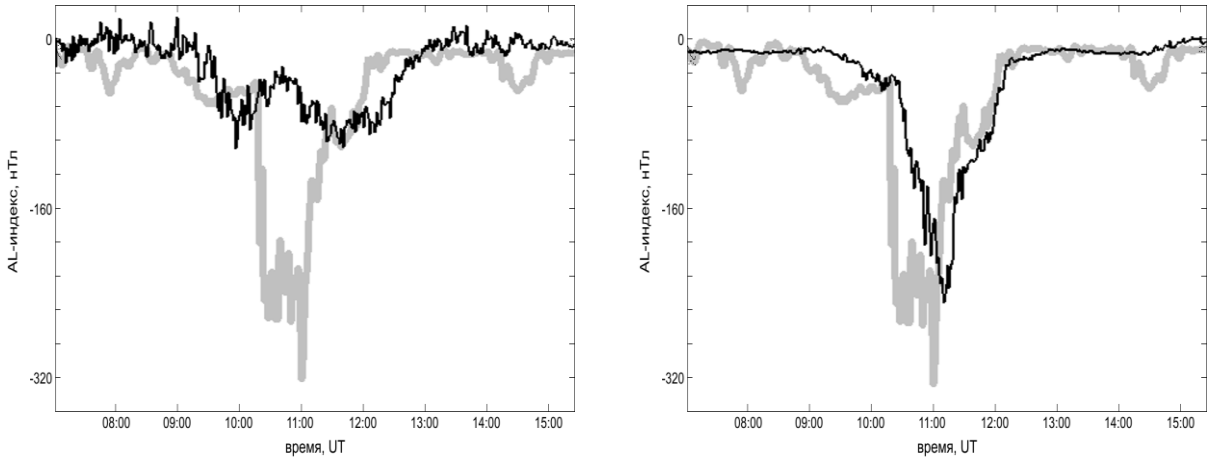

Рис. 1.4. Результат восстановления индекса AL во время суббури 02.11.2007: (а) - без интегрального параметра по мгновенным значениям (R=0.46, PE=6%), (б) - с применением интегрального параметра (R=0.77, PE=55%). Серая линия – реальные данные, черная линия – ответ ИНС.

Как можно видеть из рисунков, попытки восстановления нейросетью значений индекса AL без учета интегрального параметра при использовании мгновенных значений параметров потока солнечного ветра демонстрируют низкие линейные коэффициенты корреляции R (0.2-0.4). При этом вычисляемая эффективность восстановления PE нулевая или не превышает нескольких процентов, что говорит о невозможности восстановления и/или прогноза значений индекса AL по прямым данным с космического аппарата. Ситуация радикально изменяется после применения на входе нейронной сети предложенного интегрального параметра: корреляция R между значениями официального и восстановленного индексов AL превышает 0.7. Еще более показательна эффективность восстановления PE, которая превышает 55%. Демонстрируемые результаты подтверждают гипотезу важности учета постепенного накопления энергии для описания процесса формирования суббури.

Вторая группа экспериментов посвящена проверке предложенного алгоритма уже на суточных интервалах данных. На рис.1.5 представлен пример восстановления динамики AL-индекса, содержащем суббурю 5 января 2008 г. Демонстрируемая на рисунке успешная работа разрабатываемого алгоритма с высокой эффективностью восстановления значений AL-индекса (PE=76%) подтверждает интеллектуальные способности предлагаемой нейронной сети, поскольку восстанавливаемый интервал многократно превышает временные рамки обучающих последовательностей. Случайное

положение экстремумов при таком подходе использования входных данных исключает возможность их механического запоминания нейросетью.

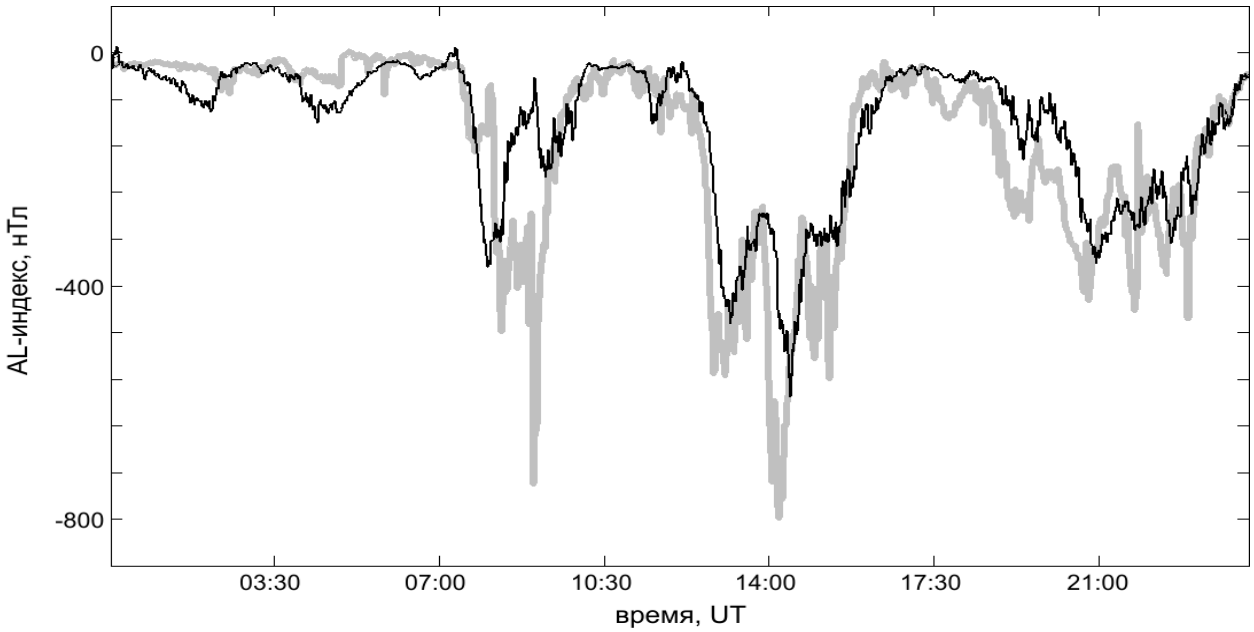

Рис. 1.5. Демонстрация восстановления индекса AL на суточном интервале данных, содержащем последовательность суббурь 5 января 2008 г. Серая линия – реальные данные, черная линия – ответ ИНС (R=0.91, PE=76%).

Заключительная группа экспериментов посвящена проверке работы ИНС с последовательным сдвигом на 60 минут тестируемых данных в пределах 2-3 часов до активной фазы суббури. При этом проверяется способность алгоритма восстанавливать значения индекса AL при разных начальных комбинациях параметров солнечного ветра, аккумулируемых интегральным параметром $\sum[N*V^2]$. Как видно на рис. 1.6, динамика исходных данных для восстановления AL-индекса не сказывается на конечном результате, что свидетельствует об устойчивой работе алгоритма.

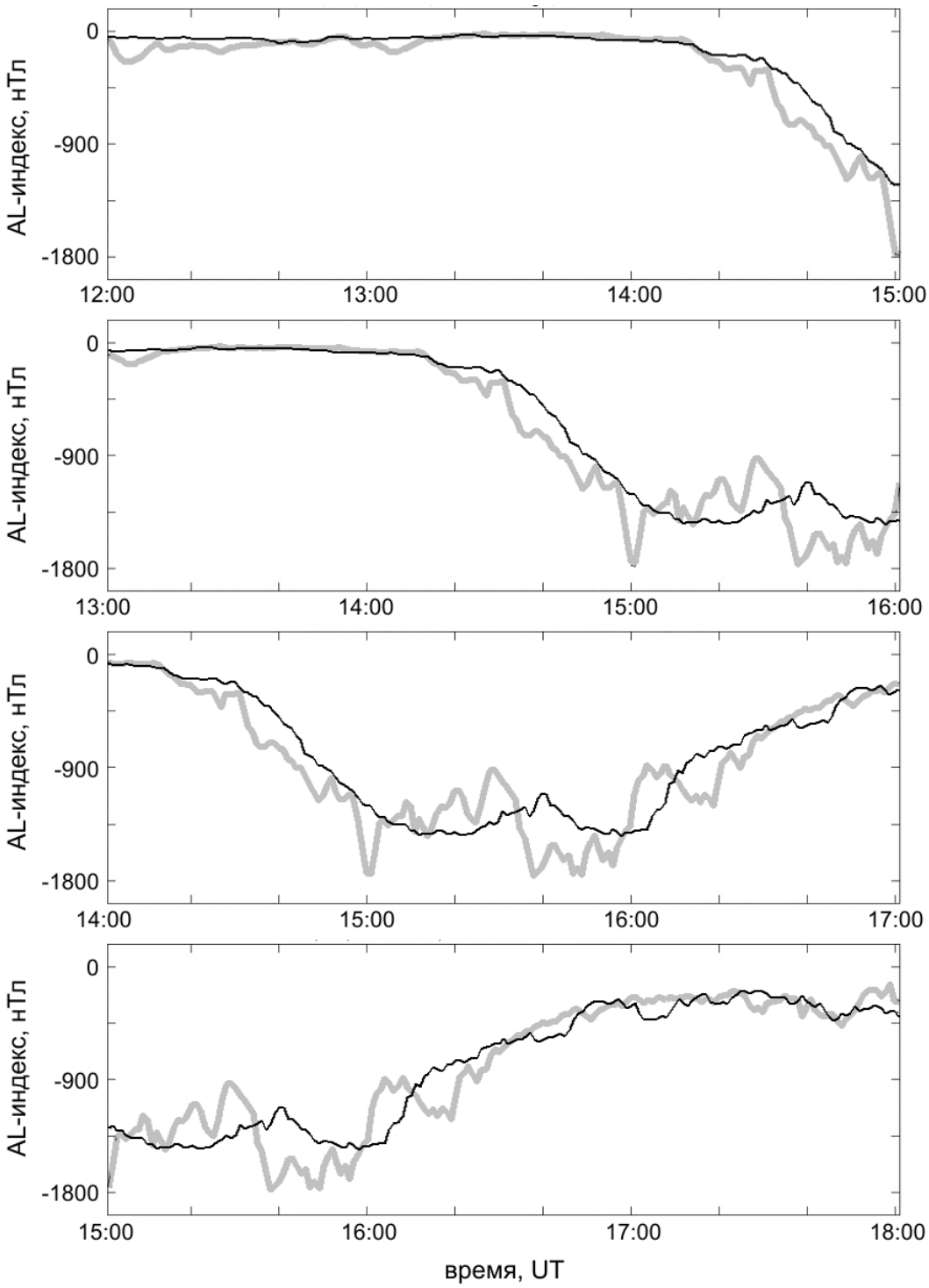

Рис. 1.6. Восстановление индекса AL во время суббури 07.01.2005 на последовательно сдвинутых тестируемых данных. Серая линия – реальные данные, черная линия – ответ ИНС.

2.3. Условия использования созданного вычислительного инструмента для успешного восстановления динамики AL индекса или его краткосрочного прогнозирования при использовании онлайн данных патрульного космического аппарата

Выполненное исследование показало возможность успешного восстановления динамики AL индекса или его краткосрочного прогнозирования при использовании онлайн данных патрульного космического аппарата. Созданный нами инструмент при учете физических явлений, приводящих к суббуре, оказался вполне интеллектуальным и дееспособным. И это произошло потому, что мы приняли во внимание процесс медленной загрузки авроральной магнитосферы кинетической энергией солнечного ветра. Дальнейшее улучшение результатов восстановления возможно при использовании предыстории AL, увеличении числа входных данных, предварительной обработки и усовершенствовании архитектуры ИНС.

Вместе с тем, предлагаемое восстановление AL-индекса с использованием интегрального параметра создает причинно-следственные ограничения на возможности прогнозирования скоротечной суббуревой активности. Дело в том, что прогноз на основе накопления «исторических» данных, которые аккумулирует в себе параметр $\sum[N*V^2]$, не может быть выполнен на временном интервале, превышающем время переноса потока солнечного ветра от патрульного космического аппарата до магнитосферы. С момента регистрации геоэффективных данных на патрульном космическом аппарате (ACE) до момента начала развития суббуревой активности в среднем проходит 45-60 минут. Это означает, что для сохранения причинно-следственных связей параметров потока в солнечном ветре и откликом магнитосферы в форме AL индекса мы не можем слишком углубляться в историю измеренных на космических аппаратах данных, поскольку возникает высокая вероятность ошибочного «прогноза» уже произошедшей суббури.

3. Явления ионосферной и геомагнитной возмущенности

Одной из важных задач исследования ионосферной и геомагнитной возмущенности является установление естественных и искусственных источников волн магнитогидродинамической (МГД) природы. К настоящему времени известно, что магнитосфера Земли является природным резонатором для альвеновских, быстрых (БМЗ) и медленных магнитозвуковых (ММЗ) волн [Гульельми и Троицкая, 1973]. Распространение альвеновских и ММЗ волн привязано к геомагнитному полю и при их отражении от проводящей ионосферы в магнитосфере возникают стоячие МГД волны. Источниками этих волн в магнитосфере Земли может являться быстрый магнитный звук. В свою очередь БМЗ волны могут проникать в магнитосферу из солнечного ветра, или генерироваться неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца на магнитопаузе при обтекании потоком солнечного ветра [Мишин и Томозов, 2014]. Скорость распространения МГД возмущений в магнитосфере может изменяться в пределах от сотен до тысяч км/с. С подобными колебаниями в настоящее время связывают геомагнитные пульсации - ультранизкочастотные (УНЧ) периодические магнитосферные возмущения, частотный диапазон которых составляет от 1 мГц до 5 Гц [Козак и др., 2013].

Появление магнитозвуковых волн в магнитосферно-ионосферной среде часто связывают с развитием геомагнитной бури. Например, в работе [Vorontsova et. al., 2016], на фазе восстановления сильной магнитной бури были обнаружены геомагнитные пульсации диапазона Pc5, во время которых по GPS-данным было отмечено увеличение концентрации ионосферы на высоте слоя F2. Авторы высказали предположение, что за одновременные плазменные и геомагнитные возмущениями может быть ответственна магнитозвуковая волна. Однако возбуждение МГД волн в магнитосфере и проводящих слоях ионосферы не обязательно может быть связано с развитием глобальных геомагнитных возмущений. Например, в исследованиях [Бархатова и др., 2009; Barkhatova et al., 2015], были обнаружены волны магнитозвукового типа, генерируемые восточным электроджетом и землетрясениями большой магнитуды. При этом наряду с возмущениями геомагнитного поля в УНЧ диапазоне отмечались синхронные возмущения в проводящем слое F2 ионосферы.

Основной целью настоящего исследования является анализ явлений, сопровождающих событие синхронной ночной ионосферной и магнитной возмущенности отмеченное в глобально магнитоспокойное время по минутным данным среднеширотной станции Казань. Рассматриваемое явление имело кратковременный характер и наблюдалось в течение 50 минут в частотном диапазоне от 0.5 до 1 мГц (периоды 15-30

минут), т.е. в области УНЧ колебаний. Отмеченная синхронизация дает основания полагать, что обнаруженные возмущения имеют магнитозвуковую природу. Для определения характерных параметров этих ионосферных и магнитных возмущений использованы методы динамического и вейвлет спектрального анализа, применение которых достаточно для установления диапазона частот и моментов синхронизации возмущений. В моменты возникновения рассматриваемой магнитозвуковой возмущенности в районе станции Казань, изучены магнитные возмущения на станциях, удаленных от нее по долготе и широте. С целью поиска причин рассматриваемой возмущенности во времена ее регистрации выполнен анализ внемагнитосферных процессов, включающих возмущенность компонент межпланетного магнитного поля (ММП), скорости и концентрации солнечного ветра. Определена связь обнаруженной ионосферной и магнитной возмущенности с суббуревой активностью, определяемой по значениям AL индекса.

3.1. Данные использованные для исследования

Возможности поиска синхронных ионосферных и геомагнитных возмущений на станции Казань (55.78° с.ш., 49.01° в.д.) определялись наличием ионосферных данных вертикального зондирования с минутным разрешением в интервале 1-15 сентября 2014 г. Анализ проводился по данным критической частоты ионосферного слоя F2 и H, D, Z компонент геомагнитного поля.

В пределах рассматриваемого интервала имела место геомагнитная буря продолжительностью более трех суток (Dst_{min} = -75 нТл). Эта геомагнитная буря имела фазу внезапного начала (SSC) длительностью 3 часа, главную фазу продолжительностью 4 часа (12 сентября 20.00 UT - 13 сентября 00.00 UT), и фазу восстановления длительностью более двух суток (13 сентября 00.00 UT - 15 сентября 07.00 UT). Значения индекса Dst за весь рассматриваемый интервал приведены на рис. 3.1. Согласно представленным данным, в остальные дни интервала (1-11 сентября) геомагнитная обстановка оставалась спокойной.

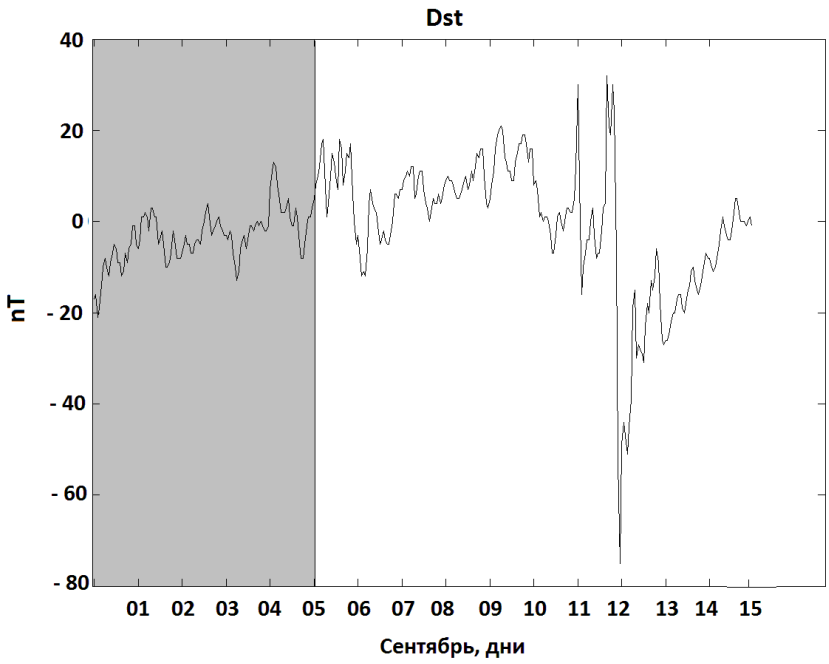

Рис. 3.1. Значения индекса Dst на интервале 1-15 сентября 2014 г. Серым цветом выделен исследуемый интервал

Отметим, что в период с 4 по 12 сентября выполнялись эксперименты по импульсному нагреву ионосферы мощным радиоизлучением на стенде «СУРА» (Васильсурск). В этой связи предполагалось, что в ионосфере возможно появление плазменных неоднородностей искусственного происхождения. С целью исключения подобных возмущений из рассмотрения, для исследования был выбран интервал с 1 по 4 сентября, в пределах которого нагревный стенд не работал, а глобальная геомагнитная обстановка оставалась спокойной.

Особенности пространственно-временного распределения магнитозвуковых (МЗ) волн были выявлены широтно-долготным анализом вариаций компонент геомагнитного поля. Для этого был выбран ряд магнитных станций, удаленных от станции Казань по широте и долготе. Список магнитных станциях приведен в Таблице 3.1.

Название станции	**Географическая широта**	**Географическая долгота**	**L-оболочка**
Sodankylä	67.37 с.ш.	26.63 в.д.	5.3
Port Alfred	46.43 ю.ш.	51.87 в.д.	2.8
Казань	55.78° с.ш.	49.01° в.д.	2.6
Hel	54.61 с.ш.	18.82 в.д.	2.5
San Fernando	36.67 с.ш.	5.50 з.д.	1.3

3.2. Обнаружение магнитозвуковых возмущений в спокойной ночной ионосфере

Поиск одновременных ионосферных и геомагнитных возмущений в рамках исследования динамических спектров критической частоты и компонент магнитного поля показал, что 1, 2 и 4 сентября они не имели совпадающих спектральных особенностей в разрешенном диапазоне частот до 8 мГц. В качестве примера на рис. 3.2 представлены динамические спектры критической частоты foF2 для 2 и 4 сентября 2014 г. Согласно приведенным спектрам, в ночной области по местному времени (+3 GMT) выраженная ионосферная возмущенность вообще отсутствует.

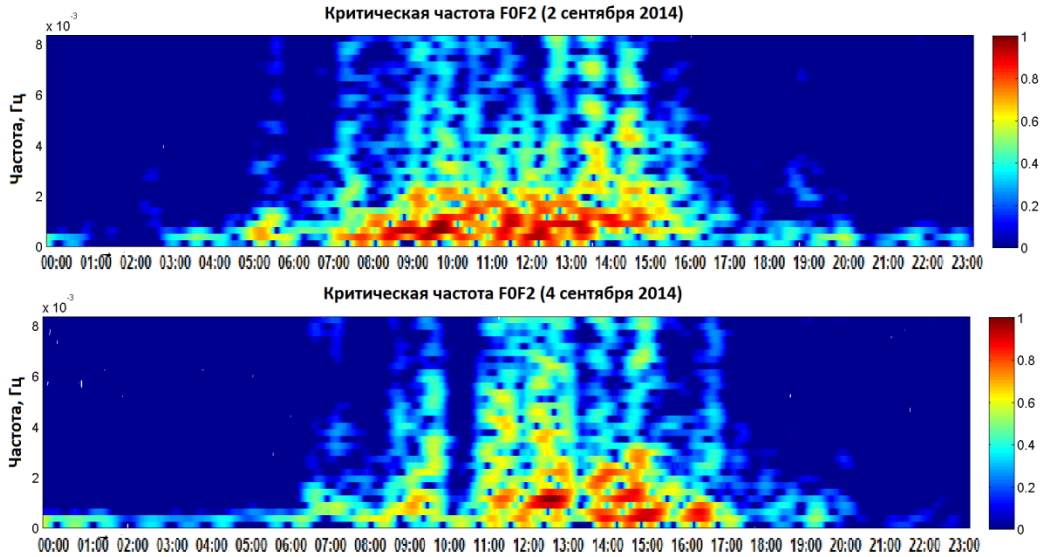

Рис. 3.2. Динамические спектры критической частоты слоя F2 для 2 сентября 2014 г (верхняя панель) и для 4 сентября 2014 г (нижняя панель); время приведено в UT

Вместе с тем 3 сентября 2014 г в местное ночное время 03.30 – 05.00 LT (00.30 – 02.00 UT) на динамическом спектре критической частоты слоя F2 были отмечены серии возмущений с характерными частотами в диапазоне 0.3 до 4 мГц. Важным обстоятельством является одновременное появление серий подобных возмущений в компонентах геомагнитного поля в том же диапазоне частот. На рис. 3.3 представлены динамические спектры критической частоты слоя F2 и H, D, Z-компонент геомагнитного поля для 3 сентября 2014 г. Здесь черными овалами отмечены области совпадения спектральных особенностей критической частоты и геомагнитного поля.

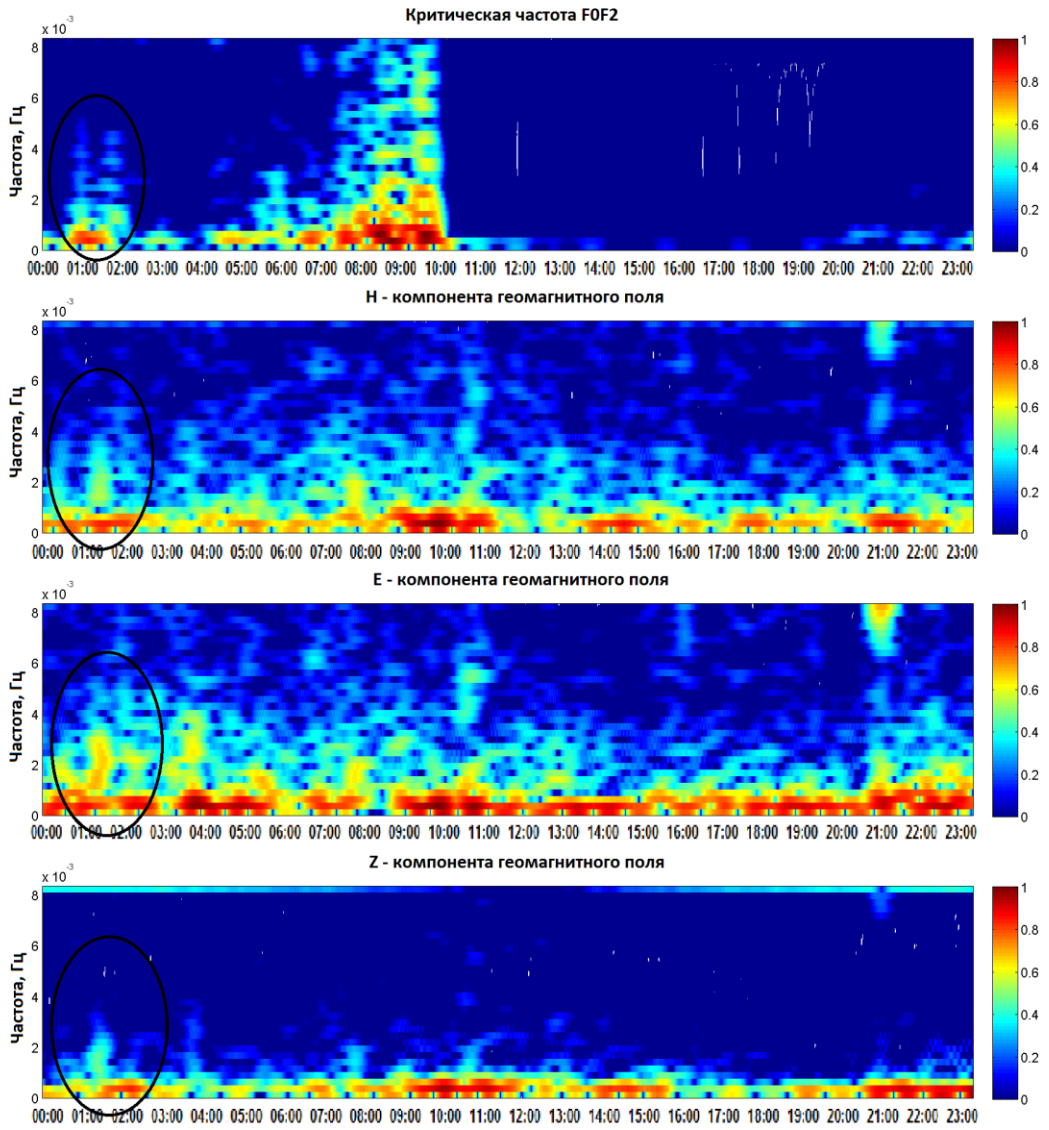

Рис. 3.3. Динамические спектры критической частоты слоя F2 (первая панель сверху), D-компоненты геомагнитного поля (вторая панель), H-компоненты (третья панель) и Z - компоненты (четвертая панель) для 3 сентября 2014 г. Черными овалами отмечены области совпадения спектральных особенностей

Совпадения спектральных особенностей демонстрируют событие синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в области ночной ионосферы. Однако динамические спектры Фурье недостаточно информативны при определении параметров реального волнового процесса. В этой связи дальнейшее исследование возможной синхронизации параметров обнаруженных возмущений было проведено с помощью анализа вейвлет-спектров. Отметим, что выбор базиса вейвлет-анализа для использования в разложении на время-частоту влияет на итоговое разрешение результата по времени и по частоте. Вместе с тем, выбором базисной функции невозможно изменить основные характеристики вейвлет-преобразования (низкие частоты имеют хорошее разрешение по

частотам и плохое по времени; высокие имеют плохое разрешение по частотам и хорошее по времени), но можно несколько увеличить общее разрешение по частотам или по времени. Общий принцип построения базиса вейвлет-преобразования состоит в использовании масштабного преобразования и смещений. За счет изменения масштабов вейвлеты способны выявить различие в характеристиках на разных шкалах и путем сдвига проанализировать свойства сигнала в разных точках на всем изучаемом интервале. В настоящем исследовании применены базисные вейвлет-функции Добеши 4 порядка.

Вейвлеты Добеши - это семейство вейвлетов, вычисляемых итерационным путем. Особенности вычисления вейвлет-спектра в виде системы для уравнений $\phi(t)$ и $\psi(t)$ позволяют получить в конечном итоге два вектора, один из которых содержит сглаженную версию сигнала, а другой – набор локальных особенностей. Такой подход упрощает выявление характерных свойств исходного ряда данных, поскольку позволяет не только определить характер и динамические параметры сигнала, но и точно локализовать его особенности: выбросы, резкие скачки уровня и т.д.

Применяемый базисный вейвлет описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \phi(t) = \sqrt{2}\sum_k h_k \phi(2t-k) \\ \psi(t) = \sqrt{2}\sum_k g_k \phi(2t-k) \end{cases}$$

где функция $\phi(t)$ описывает масштабирование вейвлета (scaling function) и функция $\psi(t)$ характеризует форму волнового пакета. Вычисление системы для каждой точки в момент времени *t* связано с вычислением коэффициентов h_k и g_k тригонометрического полинома итерационным каскадным алгоритмом. На рис. 3.4 показана временная развертка найденных функций 4 порядка.

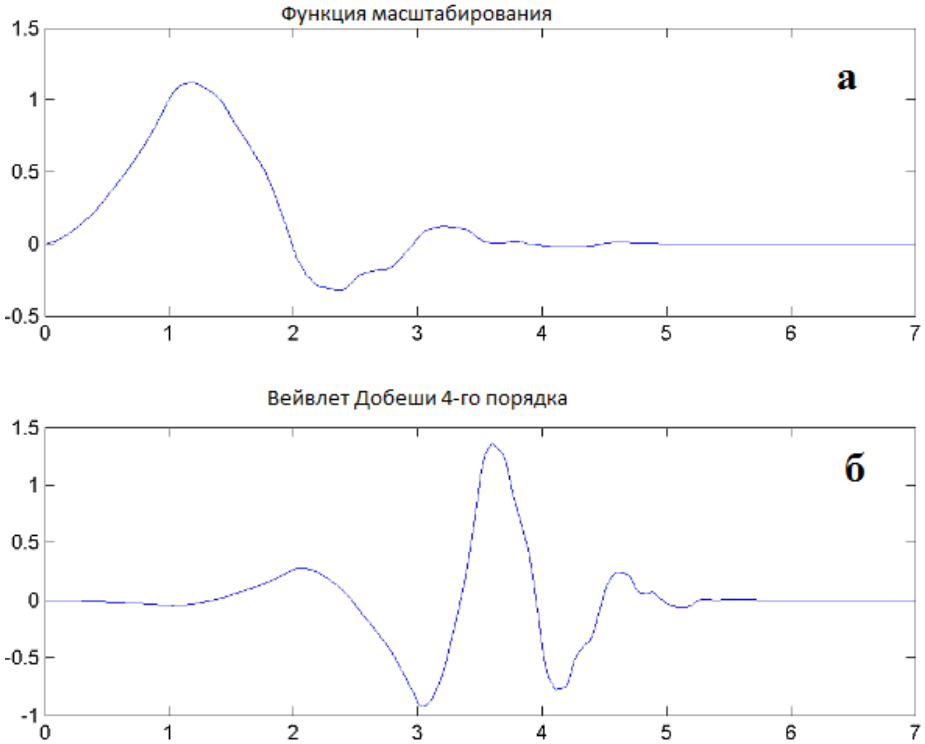

Рис. 3.4. Временная развертка функции масштабирования (а) и функции вейвлета Добеши 4 порядка (б)

На рис. 3.5 представлены вейвлет-спектры критической частоты foF2 и H-, D-компонент геомагнитного поля станции Казань, вычисленные для 3 сентября 2014 г в ночном интервале (00.00 до 02.00 UT). Черными стрелками показаны совпадения максимумов ионосферных и геомагнитных возмущений H-компоненты в интервале 01.17 – 01.55 UT. Наилучшее совпадение рассматриваемых возмущений было отмечено для периодов от 15 до 30 минут. Спектральные максимумы геомагнитных возмущений D-компоненты в рассматриваемом интервале опережают максимумы, отмечаемые для критической частоты и H-компоненты. В дальнейшем поиск синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности выполнялся на данных частоты foF2 и горизонтальной (H) компоненты геомагнитного поля.

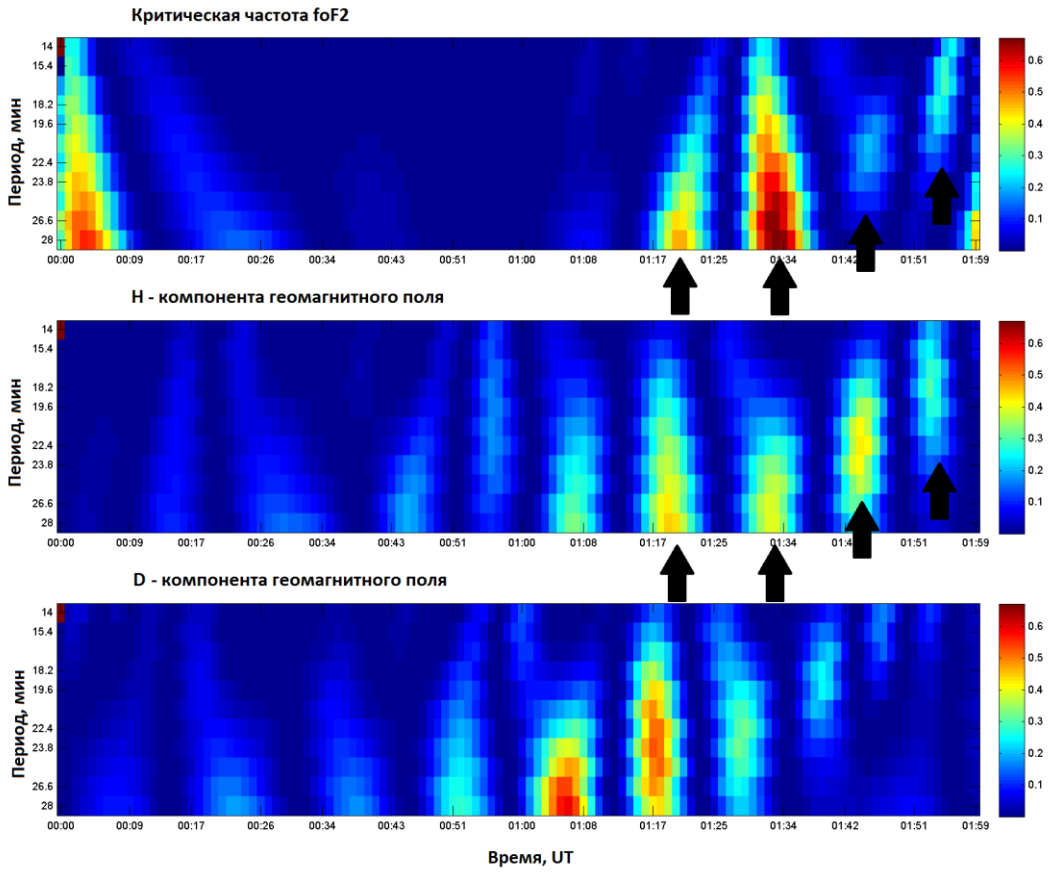

Рис. 3.5. Вейвлет-спектры критической частоты слоя F2 (первая панель сверху), H-компоненты геомагнитного поля (вторая панель) и D-компоненты геомагнитного поля (третья панель) для 3 сентября 2014 г. Черными стрелками отмечено соответствие между максимумами спектров в рассматриваемом интервале периодов между возмущениями foF2 и H-компоненты

Согласно представленным результатам, для рассматриваемого интервала характерны синхронные возмущения в ионосфере и геомагнитном поле. Характерные периоды обнаруженных магнитозвуковых возмущений принадлежат УНЧ диапазону и находится в интервале 35 - 50 минут. Факт совпадения особенностей одновременных возмущений foF2 и компонент геомагнитного поля позволяет предположить их магнитозвуковую природу.

3.3. Пространственный анализ распределения рассматриваемых МЗ волн

Выше было отмечено, что генерация МЗ волн в магнитосфере Земли может быть обусловлена вне и внутри магнитосферными источниками. В любом случае, в рассматриваемый ультранизкочастотный волновой процесс вовлекается вся магнитосфера. Наиболее близкой по долготе к Казани станцией является обсерватория Port Alfred (46.4 ю.ш., 51.8 в.д.), которая располагается в магнитосопряженной точке. На

рис. 3.6 представлены спектры критической частоты (Казань) и Н-компоненты геомагнитного поля, вычисленные по минутным данным обсерватории Port Alfred для 3 сентября 2014 г. в интервале от 00.00 до 02.00 UT. Черными стрелками показаны совпадения максимумов ионосферных и геомагнитных возмущений Н-компоненты в интервале периодов 15 – 30 минут.

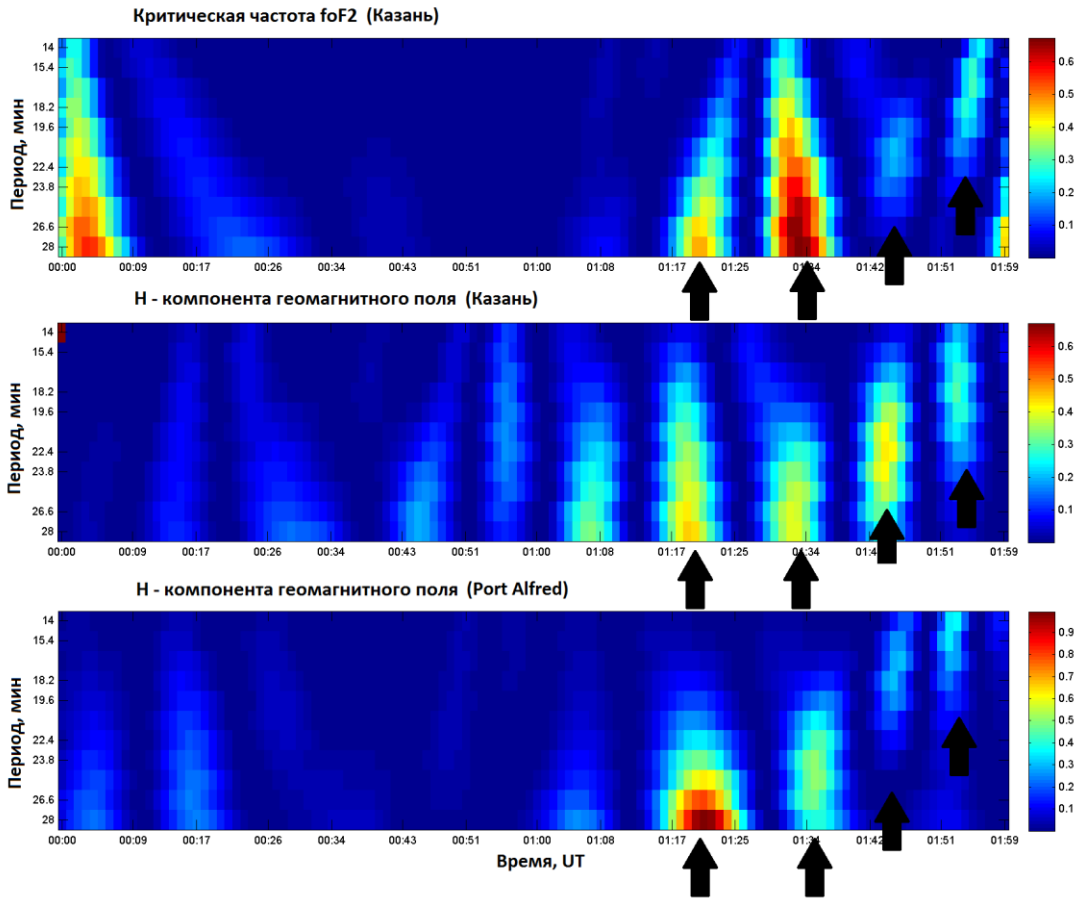

Рис. 3.6. Вейвлет-спектры критической частоты слоя F2, зарегистрированной на станции Казань (первая панель сверху), Н-компоненты геомагнитного поля на станции Казань (вторая панель) и Н-компоненты геомагнитного поля (третья панель) станция Port Alfred для 3 сентября 2014 г. Черными стрелками отмечено соответствие между максимумами спектров в рассматриваемом интервале периодов

Полученный результат совпадения спектральных максимумов критической частоты на станции Казань и Н-компонент геомагнитного поля на обсерваториях Казань и Port Alfred, находящихся в магнитосопряженных точках свидетельствует о привязке изучаемого волнового явления к соответствующей геомагнитной силовой линии.

Вопрос о принадлежности рассматриваемых волн к ММЗ, скорее привязанных к силовой линии геомагнитного поля, или к изотропному БМЗ типу может быть решен анализом вейвлет спектров возмущений, зарегистрированных на станциях, имеющих

отличные от Казани долготы. На рис. 3.7 показаны вейвлет спектры критической частоты foF2 над Казанью, а также горизонтальных и азимутальных компонент геомагнитного поля на станциях, выбранных в интервале широт 36 - 67˚ с.ш. (см. таблицу 3.1)

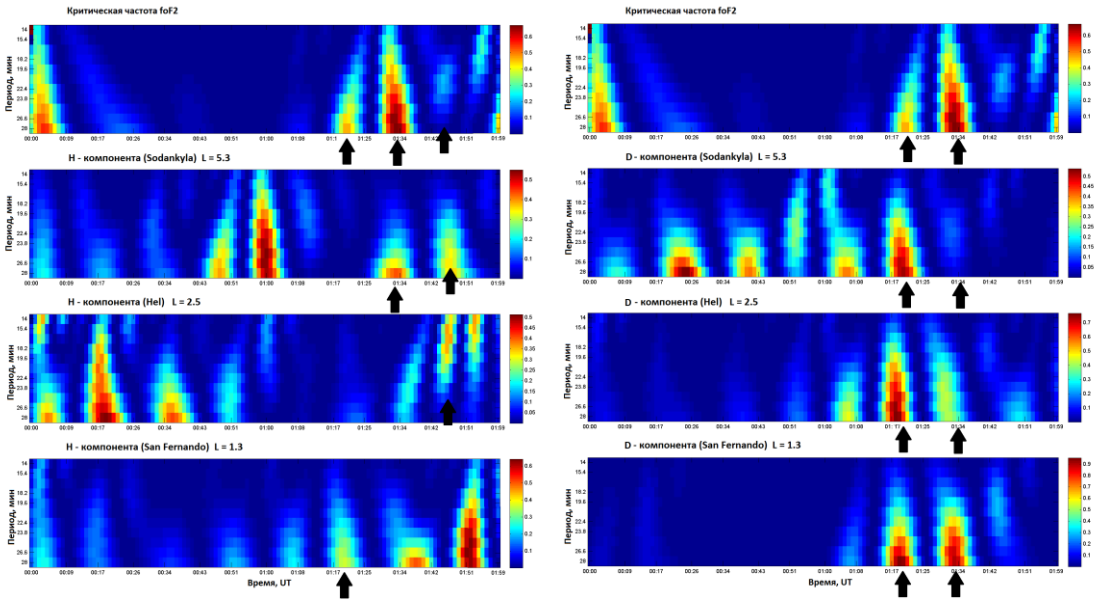

Рис. 3.7. Вейвлет спектры критической частоты foF2 на станции Казань (верхняя панель), H – компонент геомагнитного поля (слева) и D - компонент геомагнитного поля (справа) на станциях Sodankyla, Hel и San Fernando. Стрелками отмечены совпадения исследуемых возмущений foF2 в Казани и компонент магнитного поля на выбранных станциях

Согласно представленным на рис. 3.7 (левая панель) данным, первые три из рассматриваемых спектральных максимумов критической частоты (Казань, L = 2.6) имеют совпадения с максимумами H-компоненты геомагнитного поля на магнитных станциях другой долготы. Первый максимум foF2 на Казани (~ 01.17 UT) совпадает с максимумом H-компоненты низкоширотной станции San Fernando, второй максимум (~ 01.34 UT) – с максимумом на высокоширотной станции Sodankyla, третий максимум foF2 (~ 01.45 UT) – с максимумами H-компоненты на высокоширотной и среднеширотной станциях Sodankyla и Hel. Отметим, что все указанные возмущения foF2 на среднеширотной станции Казань находят отражение в горизонтальной магнитной компоненте станций, находящихся на других широтах и долготах по отношению к станции Казань.

Анализ возмущений азимутальной D компоненты геомагнитного поля на рассматриваемых станциях (рис. 3.7, правая панель) показывает, что первые два казанских максимума foF2 (~ 01.17 UT и 01.34 UT) находят своё отражение в D-компонентах на всех других рассматриваемых магнитных станциях расположенных почти вдоль одного магнитного меридиана.

Таким образом, в интервале ~ 01.17 – 01.45 UT наблюдаются возмущения, регистрируемые в горизонтальной компоненте геомагнитного поля на станциях Казань, Sodankyla, Hel и San Fernando, в пределах большой пространственной области. Это позволяет отнеси их к классу быстрых магнитозвуковых возмущений.

3.4. Возможные причины МЗ возмущенности ночной ионосферы

Выше было отмечено, что обнаруженная синхронная ионосферная и геомагнитная возмущенность может объясняться прохождением магнитозвуковых волн через исследуемую область в окрестности станции Казань. Выполним поиск возможных причин рассматриваемой возмущенности. Внемагнитосферной причиной могут являться низкочастотные колебания, регистрируемые в солнечном ветре в диапазоне (15 - 30 минут) и возникающие в нем вследствие магнитогравитационной возмущенности, связанной с солнечной активностью. Такие колебания в параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) могут быть ответственны за возникновение магнитосферно-ионосферных колебаний, проявляющихся в синхронной возмущенности критической частоты слоя F2 и компонент геомагнитного поля. Анализ параметров возмущений скорости солнечного ветра (V), протонной концентрации (P), а также компонент Bx, By и Bz ММП в рассматриваемом диапазоне частот выполнялся в пределах исследуемого временного интервала с помощью спектрального вейвлет анализа. Полученные вейвлет спектры сопоставлялись с обнаруженными ранее возмущениями критической частоты и геомагнитного поля на станции Казань.

На рис. 3.8 представлены вейвлет-спектры критической частоты foF2 на станции Казань (верхняя панель) и Bx, By, Bz компонент ММП для рассматриваемого временного интервала. Стрелками отмечены области синхронизации возмущений указанных параметров. Согласно полученным результатам, наблюдается совпадение спектральных особенностей для критической частоты foF2 и Bz компоненты ММП в интервале периодов 15-30 мин. Для компонент Bx и By ММП подобные совпадения отсутствуют. Это позволяет предположить, что возникновение рассматриваемых возмущений в ночной области ионосферы может быть связано с длиннопериодными колебаниями вертикальной компоненты ММП.

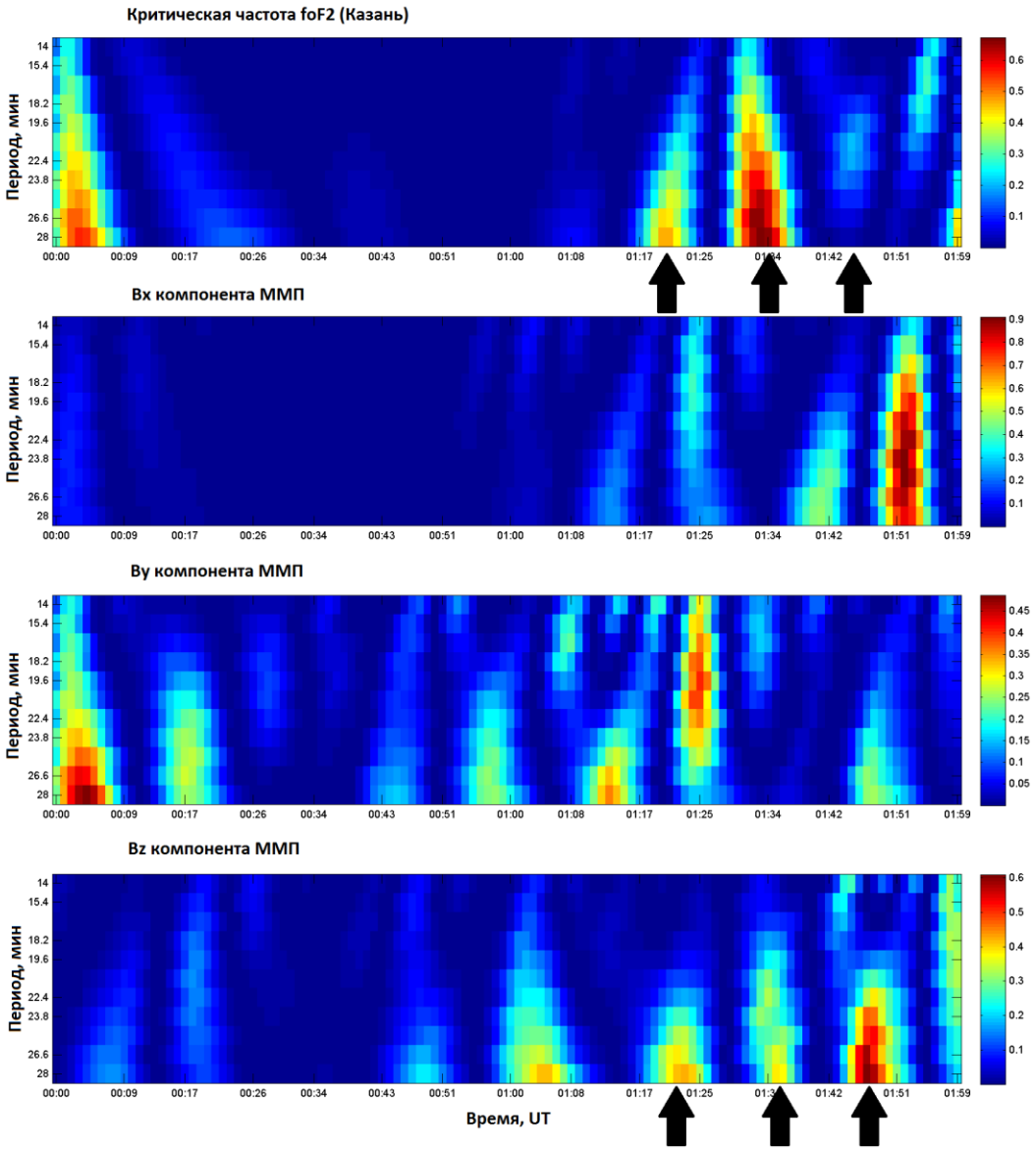

Рис. 3.8. Вейвлет-спектры возмущений критической частоты ионосферного слоя F2 и Bx, By, Bz компонент межпланетного магнитного поля для 3 сентября 2014 г. Стрелками указаны области совпадений спектральных особенностей критической частоты foF2 и Bz компоненты ММП

Известно, что ориентация и величина Bz компоненты во многом определяют глобальную и высокоширотную геомагнитные возмущенности. На последнее обстоятельство обращено внимание, например, в работе [McPherron et al., 1973], где отмечается, что период фазы зарождения суббури тесно связан с поворотом на юг Bz компоненты ММП. В этот период происходит накопление энергии в хвосте магнитосферы, которая затем сменяется ее диссипацией в период фазы развития суббури. В исследовании [Lyons, 1996] высказано предположение, что большинство магнитосферных суббурь вызываются уменьшением крупномасштабного электрического

поля, переносимого в магнитосферу из солнечного ветра. Основной причиной уменьшения электрического поля является поворот на север вертикальной компоненты ММП. Вместе с тем, в работе [Henderson et al., 1996], отмечено наличие суббурь, возникающих и при отсутствии заметных резких изменений в параметрах солнечного ветра и ММП. Несмотря на то, что на данный момент дискуссионным вопросом остается влияние направления Bz компоненты ММП, ее величины и продолжительности сохранения определенных значений на процессы зарождения суббури. Особенности связи этой компоненты с суббуревой активностью магнитосферы отмечается во многих работах, например [Бархатов и др., 2017; Воробьев и др., 2016; Henderson at al., 1996].

Таким образом, возникновение ионосферной и геомагнитной возмущенности в ночном секторе магнитосферы может быть вызвано развитием высокоширотных суббуревых процессов. При этом параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля имеют особое поведение, что позволяет выделить этапы начала, развития и распада авроральной суббури. В этой связи был выполнен анализ динамики Bx, By и Bz компонент ММП (левая панель) и параметров солнечного ветра (концентрации протонов и скорости) (правая панель), в изучаемом временном интервале. На рис. 3.9 на графиках динамики черными вертикальными линиями отмечены моменты совпадений спектральных особенностей foF2 и H-компоненты геомагнитного поля на станции Казань.

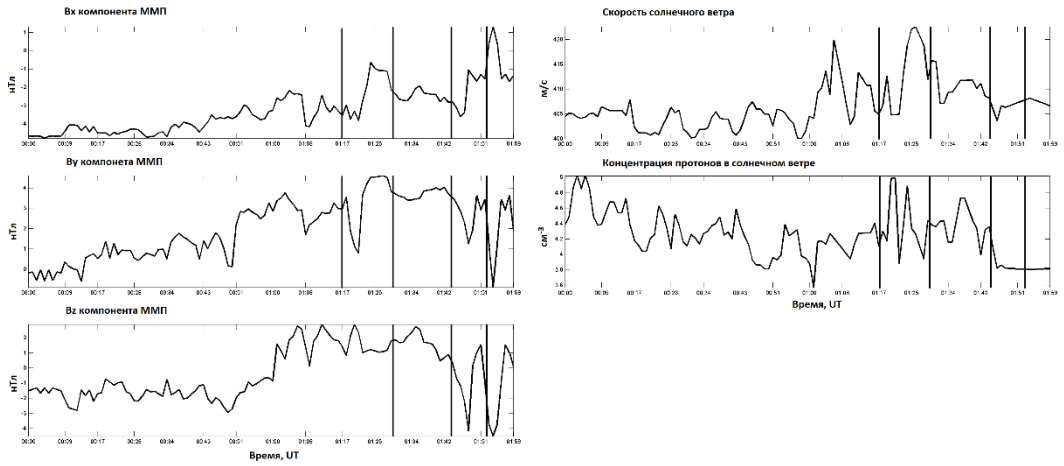

Рис. 3.9. Графики Bx, By, Bz компонент межпланетного магнитного поля (левая панель), скорости и концентрации солнечного ветра (правая панель) в интервале 00.00 – 02.00 UT для 3 сентября 2014 г. Вертикальными черными линиями отмечены моменты совпадений спектральных особенностей foF2 и H-компоненты геомагнитного поля на станции Казань

Изучение временного хода вариаций концентрации солнечного ветра показывает, что в период времени до 00.45 UT (+3 GMT Казань) наблюдаются ее повышенные

значения с дальнейшей тенденцией к снижению и достижением минимального значения в 01.00 UT. В интервале 01.00 - 02.00 UT имеет место общее увеличение скорости солнечного ветра, сохраняющиеся на протяжении всего интервала. Кроме того, во время ~ 01.00 UT происходит переход значений компоненты Bz от небольших отрицательных величин к положительным. Именно такая ситуация, согласно [Бархатов и др., 2017; Morley and Freeman, 2007], соответствует условиям для развития суббури.

Вместе с тем, интервалы суббуревой активности можно выделить, анализируя временной ход индексов авроральной активности (AU, AL). Рассматриваемый временной интервал соответствует ночному сектору магнитосферы, в котором локализован западный электроджет (AL). На рис. 3.10 выполнено сопоставление вейвлет спектров критической частоты foF2 и горизонтальной компоненты геомагнитного поля на станции Казань с вариациями индекса AL. Исследуемые ионосферные возмущения, сопровождающиеся соответствующими возмущениями компонент геомагнитного поля, находятся в интервале 01.17 – 01.55 UT.

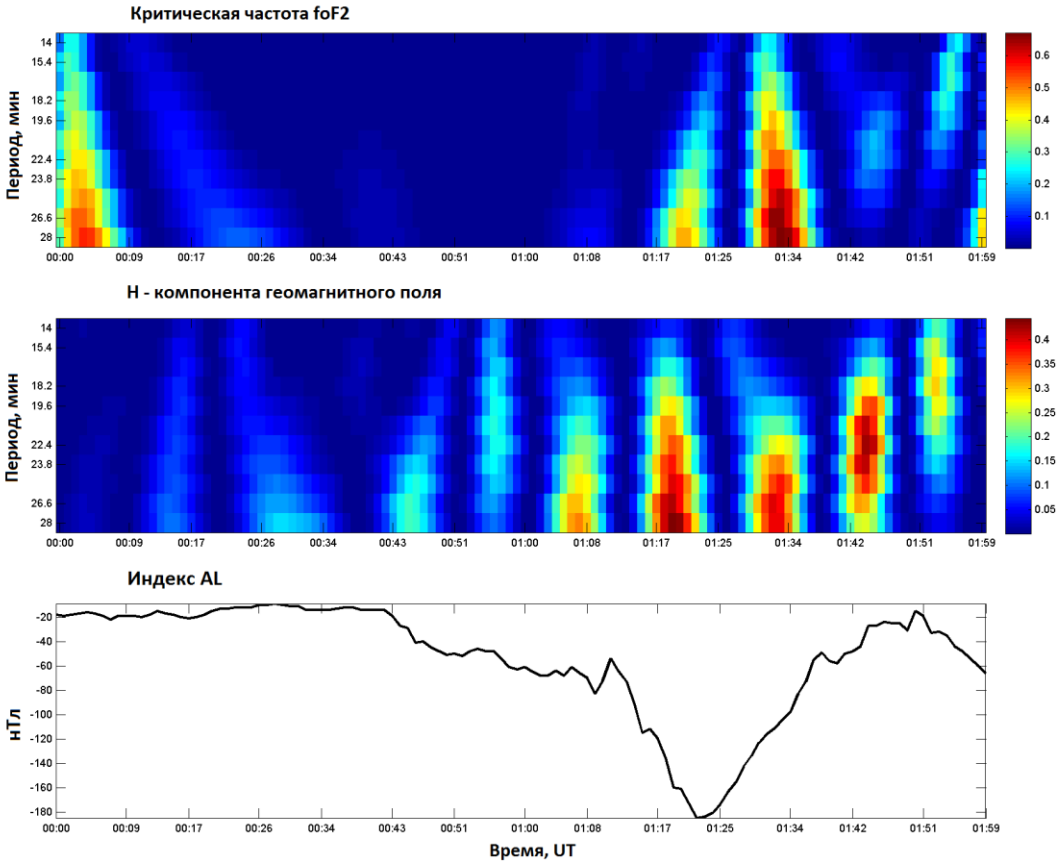

Рис. 3.10. Вейвлет-спектры возмущений критической частоты foF2 (верхняя панель), H-компоненты геомагнитного поля (средняя панель) и вариации индекса AL (нижняя панель) для 3 сентября 2014 г.

Динамика индекса AL показывает, что в рассматриваемый период имеет место бухтообразное возмущение, которому предшествует спокойный период (AL ~ -20 нТл). В интервале времени 00.43 – 01.20 UT значения индекса снижаются с достижением минимума ~ -180 нТл, а затем плавно возрастают в течение получаса до значений ~ -20 нТл. Подобная динамика свидетельствует о развитии суббуревой активности в авроральной области ночной ионосферы. Все исследуемые синхронные возмущения критической частоты foF2 и геомагнитного поля находятся в пределах суббури.

Таким образом, спектральный анализ компонент ММП и параметров солнечного ветра показал, что внемагнитосферным источником рассматриваемой ионосферной и геомагнитной МЗ возмущенности могут являться возмущения Bz компоненты ММП. Это происходит на фоне увеличения скорости солнечного ветра и опережающего увеличения значений его концентрации. Такая ситуация в ММП и солнечном ветре и отвечает условиям развития суббури.

Одновременно с суббурей происходит вытягивание силовых линий в геомагнитный хвост, которые подвергаются сверхнизкочастотной вибрации возмущенным замагниченным солнечным ветром. Тогда одним из источников МЗ волн в рассматриваемом диапазоне частот может являться суббуревая активность [Белаховский и др., 2015], вызываемая возмущениями в солнечном ветре. Обнаруженные нами на большой пространственной области МЗ возмущения могут быть генерированы нестабильностью западного электроджета, который участвует в суббуревом процессе в качестве элемента крупномасштабной трёхмерной токовой системы – токового клина суббури или Substorm Current Wedge (SCW).

3.5. Условия синхронизации ионосферной и геомагнитной возмущенности в классе Pi3 пульсаций на средних широт в местное ночное время

Результаты выполненных исследований демонстрируют возможность существования в области средних широт в местное ночное время в глобальных геомагнитоспокойных условиях синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в классе Pi3 пульсаций. Это установлено сопоставлением спектральных картин критической частоты foF2 над станцией Казань и компонент геомагнитного поля на большой пространственной области, включающей высокие, средние и низкие широты. Определена наиболее вероятная внемагнитосферная причина зарегистрированной магнитозвуковой возмущенности, которая проявляется в суббуревое время и связана с вариациями Bz компоненты ММП. Приведем кратко основные результаты работы:

1. Обнаружены совпадения спектральных особенностей динамических фурье-спектров критической частоты слоя F2 и H, D, Z компонент на станции Казань в ночное местное время (00:00 – 02:00 UT, 03:00 – 05:00 LT) для 3 сентября 2014. При этом накануне и на следующий день (2 и 4 сентября), в сходных геомагнитных условиях подобной возмущенности не наблюдается. Таким образом, продемонстрирована возможность возникновения синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в области средних широт.
2. Методом вейвлет-анализа определены характерные периоды обнаруженных возмущений, которые лежат в диапазоне УНЧ колебаний и составляют от 15 до 30 минут. При этом совпадения спектральных особенностей на станции Казань отмечаются для частоты foF2 и H-компоненты геомагнитного поля, что позволяет предположить их магнитозвуковую природу.
3. Принадлежность рассматриваемых возмущений к классу БМЗ волн установлена на основе анализа фактов совпадений спектральных особенностей foF2 над Казанью с возмущениями H и D компонент геомагнитного поля на магнитных станциях, отличных от Казани по долготе и широте.
4. Обнаружена синхронизация обнаруженной ранее ионосферной и геомагнитной возмущенности на станции Казань с возмущениями Bz компоненты ММП. Можно считать, что длиннопериодные колебания Bz компоненты ММП находят своё отражение в среднеширотной ионосфере и компонентах геомагнитного поля. Установлено, что в рассмотренном случае это явление возникает в суббуревой период.

Таким образом, существование синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в ночном секторе среднеширотной ионосферы может быть обусловлено внемагнитосферным источником, которым в рассматриваемом случае могут являться возмущения Bz компоненты ММП. Происходящая при этом смена ориентации Bz компоненты, увеличение скорости солнечного ветра и опережающее увеличение значений его концентрации, создает условия для развития суббури. Одновременно с развитием суббуревой активности происходит вытягивание силовых линий в геомагнитный хвост, которые оказываются возмущены УНЧ колебаниями замагниченного солнечного ветра. Обнаруженные на большой пространственной области БМЗ возмущения могут быть генерированы нестабильностью западного электроджета, связанной с развитием суббуревого процесса.

Список использованных источников

- Бархатов Н.А., Королев А.В., Левитин А.Е., Сахаров С.Ю. Коррекция современных индексов интенсивности авроральных электроструй, определяемых по данным меньшего числа магнитных обсерваторий, чем были получены классические индексы AE // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т.43. N 6. С. 748-751

- Бархатов Н.А., Королев А.В., Левитин А.Е., Сахаров С.Ю. Пересчет современных индексов полярной активности к классическим // Известия ВУЗов "Радиофизика". 2004. Т.47. N 3. С.200-208

- Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Искусственные нейронные сети в задачах солнечно-земной физики. Монография. Изд. «Поволжье», 2010, 407 с.

- Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия, Т.57, №3, с. 251–256, 2017

- Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Григорьев Г.И. Обнаружение магнитогравитационных волн в ионосфере по анализу максимально наблюдаемых частот на трассах наклонного зондирования // Изв. ВУЗов Радиофизика. 2009. Т.52, №10. С.761-778.

- Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н. Иррегулярные Pi3 пульсации и их связь с потоками заряженных частиц в магнитосфере и ионосфере // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity. 2015. P. 71-74.

- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. 2016. С. 721-732. DOI: 10.7868/S001679401606016X

- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М: Наука. 1973. С. 208.

- Мишин В.В., Томозов В.М. Проявления неустойчивости Кельвина–Гельмгольца в атмосфере солнца, солнечном ветре и магнитосфере земли // Солнечно-земная физика. Вып. 25. 2014. С. 10–20

- Черемных О. К., Ямпольский Ю.М., Агапитов А.В., Зализовский А.В., Ивченко В.Н., Козак Л.В., Парновский А.С., Рапопорт Ю.Г., Селиванов Ю.А., Колосков А.В., Черемных С.О. Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы земли в космическом проекте РЕЗОНАНС // Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 2. С. 5–42.

- Barkhatov N.A., Revunov S.E., Uryadov V.P. Forecasting of the critical frequency of the ionosphere F2 layer by the method of artificial neural networks // Int. J. Geomagn. Aeron. GI2010, DOI:10.1029/2004GI000065. 2004.

- Barkhatova O. M., Barkhatov N. A., Kosolapova N. V. Distribution of Magnetogravity Waves During Strong Earthquakes (M > 6.5) Preparation Periods // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55, N. 3. P. 369–377.
- Davis T.N., Sigiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J.Geophys. Res. V. 71. No. 3. P. 785-801. DOI: 10.1029/JZ071i003p00785. 1966.
- Henderson M.G., Reeves G.D., Belian R.D., Murphree J.SD. Observations of magnetospheric substorms occurring with no apparent solar wind/IMF trigger // J. Geophys. Res. V. 101 № A5. 1996. P. 10773-10792
- Hernandez J.V., Tajima T., Horton W. Neural net forecasting for geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett. V. 20. No. 23. P. 2707- 2710. DOI:10.1029/93GL02848. 1993.
- Li X., Oh K.S., Temerin M. Prediction of the AL index using solar wind parameters // J. Geophys. Res. V. 112. A06224. DOI: 10.1029/2006JA011918. 2007.
Holschneider M. Wavelets: An Analysis Tool // Oxford University Press. 2005. P. 448
- McPherron R.L. Growth phase of magnetospheric substorms // J. Geophys. Res. V. 75. No. 28. P. 5592-5599. 1970.
- Morley S.K., Freeman M.P. On the association between northward turnings of the interplanetary magnetic field and substorm onsets//Geophys. Res. Lett. V. 34. L08104. 2007. doi 10.1029/2006GL028891
- Skeel R. D., Berzins M. A method for the spatial discretization of parabolic equations in one space variable // SIAM Journal on Scientific & Statistical Computing. 1990. V. 11. P. 1–32.
- Valach F., Bochnicek J., Hejda P., Revallo M. Strong magnetic activity forecast by neural networks under dominant southern orientation of interplanetary magnetic field // Adv. Space Res. V. 53. No. 4 P. 589-598. DOI:10.1016/j.asr.2013.12.005. 2014
- Vorontsova E., Pilipenko V., Fedorov E., Sinha A.K., Vichare G. Modulation of total electron content by global Pc5 waves at low latitudes // Advances in Space Research. 2016. N.57. P. 309-319
- Weigel R.S., Horton W., Tajima T. Forecasting auroral electrojet activity from solar wind input with neural networks // Geophys. Res. Lett. V. 26. No. 10. P. 1353-1356. DOI:10.1029/1999GL900280. 1999.
- Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D. Solar wind coupling to and predictability of ground magnetic field and their time derivatives // J. Geophys. Res. V. 107. No. A7. 1298. DOI: 10.1029/2002JA009627. 2003.

Приложение А. Список публикаций, выполненных в рамках проекта (этап 2017 г.)

1. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Гелиогеофизические приложения современных методов обработки цифровых данных: монография. М.: ФЛИНТА. Нижний Новгород: Мининский университет, 2017. 316 с.

2. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Отражение динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия, Т.57, № 3, с. 273–279, 2017

3. Barkhatov N. A., Vorob'ev V. G., Revunov S. E., and Yagodkina O. I. Effect of Solar Dynamics Parameters on the Formation of Substorm Activity // Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 57, No. 3, pp. 251–256, 2017.

4. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Условия существования быстрых магнитных облаков солнечного ветра сопровождаемых ударными волнами. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.53-54. 2017

5. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Виноградов А.Б., Главацкий Ю.А. Связь динамики высокоширотной геомагнитной активности с изменениями параметров магнитных облаков. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений»,
13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.54. 2017

6. Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В. Явление синхронизации ионосферных и геомагнитных УНЧ возмущений в районе станции Казань в геомагнитоспокойный период. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.70-71. 2017

7. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Возможная причина возникновения ударных волн у магнитных облаков солнечного ветра. Труды XXI научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г.). с. 83-85. 2017

8. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Главацкий Ю.А. Причинно-следственная связь динамики

высокоширотной геомагнитной активности с типом магнитного облака солнечного ветра. Труды XXI научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г.). с. 86-89. 2017

9. Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В. Синхронизация геомагнитных и ионосферных возмущений на фоне суббуревого процесса. Труды XXI научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г.). с. 90-93. 2017

10. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Glavatskij Yu.A. The causal relationship between the dynamics of high-latitude geomagnetic activity and type of solar wind magnetic cloud. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, 2017. pp.74-75

11. Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Possible cause of solar wind magnetic cloud shock waves. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, 2017. pp.76-77

12. Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances on the substorm process background. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, 2017. pp.97-99

13. Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V., Revunov S.E. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances over Kazan station // Solar Terrestrial Physics, 2017, V.3, Iss.4, pp. 11-21, UDC 550.388.2 DOI: 10.12737/szf-33201701

14. Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Событие синхронных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле над станцией Казань // Солнечно-Земная физика, 2017, Т.3, № 4, с. 24-36