1.7. Аннотация, публикуемая на сайте Фонда (не более 1 стр.; описать содержание фактически проделанной работы и полученные результаты за период, на который предоставлен грант; для итогового отчета - описать содержание фактически проделанной работы и полученные результаты за весь период работы по Проекту)

Проект посвящен исследованию геомагнитных колебаний МГД диапазона. Работа выполнена в рамках фундаментальной проблемы обнаружения связи долгопериодных электромагнитных и плазменных колебаний МГД диапазона в околоземном пространстве с явлениями солнечной активности. Особое внимание уделено геомагнитным колебаниям, возбуждение которых связано с подготовительными процессами солнечной вспышечной активности, поскольку такие явления, как правило, ассоциируются с началом и дальнейшим развитием глобальной магнитосферной бури. Анализируемые вариации геомагнитного поля отражают условия взаимодействия МГД волн солнечного ветра с магнитосферной плазмой и поэтому содержат информацию о состоянии околоземного космического пространства. В ходе решения поставленных задач показано, что анализируемые колебания участвуют в процессах передачи энергии из солнечного ветра в магнитосферу и отражают резонансные внутримагнитосферные явления.

В работе задействованы авторские алгоритмы постпроцессинга вейвлет-спектров колебаний, что позволило исследовать тонкие, локальные особенности процессов. На их основе разработаны корреляционно-спектральные методы наземной дистанционной диагностики околоземного пространства, находящегося под влиянием факторов солнечной активности.

В рамках отмеченной фундаментальной проблемы, в проекте получены следующие результаты.

Продемонстрирована фундаментальная закономерность причинно-следственной связи долгопериодных вариаций геомагнитного поля с предвспышечным повышением уровня электромагнитной возмущенности. Отмечено установление общего гармонического режима, характеризуемого вейвлет-скелетонными спектрами и синхронизацией колебаний горизонтальной составляющей геомагнитного поля для периодов 28-38 минут и 68-88 минут приблизительно за 2 дня до вспышки на разных обсерваториях. Показано, что единственной возможностью усиления колебаний геомагнитного поля и их синхронизации в широких географических пределах является увеличение ионосферной проводимости под действием солнечного ионизирующего электромагнитного излучения, опережающего вспышку, и как следствие – усиление ионосферных колебательных токовых систем.

Обнаружено, что в ночном секторе среднеширотной ионосферы на фоне возникновения суббуревого процесса возможно существование синхронизации геомагнитной возмущенности не только на географически большой пространственной области, но и одновременной ионосферной возмущенности. Показано, что такая магнитно-плазменная возмущенность может быть обусловлена внемагнитосферным источником в виде возмущений Bz компоненты ММП. При этом УНЧ колебания замагниченного солнечного ветра возмущают вытянутые силовые линии геомагнитного хвоста и генерируют нестабильность западного электроджета, которая отражается в регистрируемых БМЗ возмущениях.

3.5. Важнейшие результаты, полученные в ходе реализации Проекта

Установлены фундаментальные закономерности причинно-следственной связи долгопериодных вариаций геомагнитного поля с предвспышечным повышением уровня электромагнитной возмущенности. Обнаружена связь моментов синхронизации колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля в широких географических пределах с опережающими явлениями рентгеновских вспышек в разных диапазонах периодов. Показано, что суммарные гистограммы колебаний для периодов 28-38 минут и 68-88 минут имеют экстремумы приблизительно за 2 дня до вспышки, что позволяет сделать вывод о ее приближении.

Обнаружены синхронные возмущения в ионосфере и геомагнитном поле с максимумами в интервале периодов от 35 до 50 минут, которые могут быть вызваны распространением в ионосфере волны магнитозвукового типа разной поляризации. На это указывает анализ спектральных особенностей синхронных возмущений, которые меняются со временем: совпадения сначала отмечаются для F0F2 и H компоненты, а затем - для F0F2 и E компоненты геомагнитного поля.

Показано, что 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 СВ и опережающее увеличение концентрации протонов, свидетельствует о том, что это происходит на фоне развития суббури. Одновременно с развитием суббуревой активности происходит вытягивание силовых линий в геомагнитный хвост, которые возмущаются УНЧ колебаниями замагниченного СВ. Предположено, что обнаруженные при этом на большой пространственной области БМЗ возмущения могут быть генерированы нестабильностью западного электроджета, связанной с развитием суббуревого процесса.

3.6. Сопоставление результатов, полученных в ходе реализации с мировым уровнем

Решение поставленной в проекте задачи установления причинно-следственной связи предвспышечной солнечной активности с интенсификацией долгопериодных колебаний геомагнитного поля отвечает актуальным направлениям современной солнечно-земной физики. В результате выполненной работы нами предложен прогностический метод для целей предсказания солнечной вспышечной активности. Как известно, солнечные вспышки вызывают магнитные бури, приводящие к техногенным катастрофам разной степени. Ранее отмечалось, что за несколько дней до развития солнечных вспышек в магнитосфере могут наблюдаться долгопериодные геомагнитные колебания, обнаруживаемые в компонентах геомагнитного поля, по данным наземных обсерваторий [Быстров и др., 1978; Быстров и др., 1979]. Позднее полученные результаты спектрального анализа колебаний в межпланетном магнитном поле и геомагнитном поле подтвердили существование флуктуаций поля с периодами от нескольких минут до десятков минут до, в период и после солнечных вспышек [Шельтинг и др., 1984; Обридко и Шельтинг, 1985; Malygin and Snegirev, 1985]. В работах [Снегирев и др., 2005; Снегирев и др., 2009] подтверждены результаты исследований по установлению эффекта возрастания долгопериодных колебаний H компоненты магнитного поля Земли на временном интервале за 1-2 суток до мощных солнечных вспышек. Анализ работ, посвященных изучению долгопериодных флуктуаций геомагнитного поля, предшествующих крупным

солнечным вспышкам, позволил в [Снегирев и др., 2011] сделать вывод о реальности создания метода краткосрочного прогноза солнечной вспышечной активности, и в 2013 году был получен патент «Способ прогноза геоэффективных солнечных вспышек» [Снегирев и др., 2013]. Предлагаемый нами подход реализован с привлечением значительного экспериментального материала, включающего периоды экстремальных рентгеновских вспышек. Применяемые методы скелетонного вейвлет-анализа геомагнитных колебаний в разных масштабах в течение пятидневных интервалов, предшествующих каждой вспышке позволили установить возможность использования фактов синхронизации получаемых скелетонов в качестве предвестников возникновения мощных солнечных вспышек. Алгоритм сравнительного анализа скелетонных спектров, позволяющий объективно оценить факты синхронизации колебаний компонент геомагнитного поля на разных станциях, является авторской разработкой и не имеет аналогов. Надежность работы алгоритма подтверждена демонстрацией прогнозирования недавнего экстремального вспышечного события на Солнце 06.09.2017, вызвавшего сильную геомагнитную бурю.

Другая поставленная в проекте задача поиска количественной связи особенностей пространственно-временного распределения внутримагнитосферных долгопериодных вариаций с вариациями параметров солнечных плазменных потоков, зарегистрированных в околоземном пространстве, отвечает одной из важных задач исследования ионосферной и геомагнитной возмущенности, связанной с установлением 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, 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 быть быстрый магнитный звук. В свою очередь, БМЗ волны могут проникать в магнитосферу из солнечного ветра (СВ) или генерироваться неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца на магнитопаузе при обтекании потоком СВ [Мишин, Томозов, 2014]. Скорость распространения МГД возмущений в магнитосфере может изменяться в пределах от сотен до тысяч километров в секунду. С подобными колебаниями в настоящее время связывают геомагнитные пульсации — ультранизкочастотные (УНЧ) периодические магнитосферные возмущения, частотный диапазон которых составляет от 1 мГц до 5 Гц. Появление МЗ 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 полного электронного содержания на высоте слоя F2. Авторы высказали предположение, что за одновременные плазменные и геомагнитные возмущения может быть ответственна МЗ волна. Однако возбуждение МГД волн в магнитосфере и проводящих слоях ионосферы не обязательно может быть связано с развитием глобальных геомагнитных возмущений. Например, авторами работ [Бархатова и др., 2009; Barkhatova et al., 2015] были обнаружены волны МЗ 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.

В проекте выполнен 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 мин в частотном диапазоне от 0.5 до 1 мГц (периоды 15–30 мин), т.е. в области УНЧ колебаний. Выявленная

синхронизация дает основания полагать, что обнаруженные возмущения имеют МЗ природу. Для определения характерных параметров этих ионосферных и магнитных возмущений использованы методы динамического и спектрального вейвлет-анализа, достаточные для установления диапазона частот и моментов их синхронизации. В моменты возникновения рассматриваемой МЗ возмущенности в районе ст. Казань изучены вариации геомагнитного поля на станциях, удаленных от нее по долготе и широте. С целью поиска причин рассматриваемой возмущенности во время ее регистрации выполнен анализ внемагнитосферных процессов, включающих изменения динамики компонент ММП, скорости и концентрации протонов в СВ. В результате исследования определена связь обнаруженной ионосферной и магнитной возмущенности с суббуревой активностью, определяемой по значениям AL индекса. Полученные результаты демонстрируют возможность существования в области средних широт в местное ночное время в глобальных геомагнитоспокойных условиях синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в классе Pi3 пульсаций. Этот факт установлен путем сопоставления спектральных картин критической частоты foF2 над ст. Казань и компонент геомагнитного поля на большой пространственной области, включающей высокие, средние и низкие широты. Определена наиболее вероятная внемагнитосферная причина зарегистрированной МЗ возмущенности, которая проявляется в суббуревое время и связана с вариациями Bz компоненты ММП.

Цитируемая литература:

1. 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.
2. 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.
3. Malygin V.I., Snegirev S.D. Longperiod pulsations of the earths magnetic field with periods more than 20 minutes before proton flares on the Sun // Planetary And Space Science. V.33. No. 11. P. 1251–1257. 1985.
4. Vorontsova E., Pilipenko V., Fedorov E., et al. Modulation of total electron content by global Pc5 waves at low latitudes // Adv. Space Res. 2016. N. 57. P. 309–319.
5. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Шадруков Д.В. Уточнение типов солнечных плазменных потоков по анализу вне- и внутримагнитосферных низкочастотных колебаний в периоды магнитных бурь // Приволжский научный журнал. ННГАСУ. №1. С. 106-112. 2013.
6. 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.
7. Быстров М.В., Кобрин М.М., Снегирев С.Д. Квазипериодические пульсации магнитного поля Земли с периодами 20-200 минут и их связь с аналогичными пульсациями в радиоизлучении Солнца перед протонными вспышками // Геомагнетизм и аэрономия. Т.2. С. 306-318. 1979.
8. Быстров М.В., Кобрин М.М., Снегирев С.Д. Пульсации геомагнитного поля перед солнечными протонными вспышками // Письма в астрономический журнал. № 4. С. 143-144. 1978.
9. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. С. 208.
10. Мишин В.В., Томозов В.М. Проявления неустойчивости Кельвина—Гельмгольца в атмосфере солнца, солнечном ветре и магнитосфере земли // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 10–20.

11. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Флуктуационные характеристики ММП в диапазоне $3*10^{-4}$-10^{-2} Гц // Геомагнетизм и аэрономия. Т.25. № 6. С. 881-891. 1985.
12. Снегирев С.Д., Смирнова А.С., Шейнер О.А. О возможностях использования наблюдений магнитного поля Земли в прогнозе солнечной вспышечной активности // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Радиофизика. № 5-3. С. 152-159. 2011.
13. Снегирев С.Д., Фридман В.М., Шейнер О.А. О флуктуациях магнитного поля земли, предшествующих крупным солнечным вспышкам // Солнечно-земная физика. № 8. С. 27-29. 2005.
14. Снегирев С.Д., Шейнер О.А., Смирнова А.С. Способ прогноза геоэффективных солнечных вспышек // Пат. Российская Федерация, МПК G01W1/10. Заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский радиофизический институт» (RU) № 2491583, заявл. 17.02.2012. опубл. 27.08.2013. бюлл. №24. 10 с.: 4 ил. 2013.
15. Шельтинг Б.Д., Вальчук Т.Е., Обридко В.Н., Фельдштейн Я.И. Флуктуации межпланетного и геомагнитного полей в связи с протонными вспышками // Геомагнетизм и аэрономия. Т. XXIV. №4. С.557-568. 1984.

3.7. Методы и подходы, использованные в ходе реализации Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

В ходе реализации проекта при решении задач регистрации колебаний в компонентах геомагнитного поля применены методы вычисления амплитудно-частотных Фурье-спектров для исследуемых магнитограмм. Поскольку в поставленных нами задачах была необходима проверка факта регистрации однотипных долгопериодных гармоник на анализируемых геомагнитных обсерваториях в конкретный момент времени и подсчет объективной количественной оценки согласованности получаемых спектров, то классическое преобразование Фурье было заменено во многих случаях на вейвлет-преобразование с подбором соответствующей базисной функции. 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 - наоборот), 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 с помощью вейвлетов можно выявить различие в характеристиках на разных шкалах и путем сдвига проанализировать свойства сигнала в разных точках на всем изучаемом интервале. В ходе реализации проекта применены базисные вейвлет-функции Добеши 4 порядка. Вейвлеты Добеши - это семейство вейвлетов, вычисляемых итерационным путем. Особенности вычисления вейвлет-спектра в виде системы уравнений двух уравнений (масштабная функция и волновой пакет) 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.

В ходе работы над проектом использована разработанная нами ранее методика представления результатов с помощью скелетонной постобработки вейвлет-картин возмущений компонент геомагнитного поля. Такой подход позволяет проследить изменения вейвлет-коэффициентов на разных масштабах во времени, а также выявить

картину локальных экстремумов расчетных поверхностей. Таким способом могут быть получены соответствующие графики локальных максимумов (скелетоны) вейвлет-спектра. Новизна предлагаемого здесь подхода заключается в применении скелетонной техники обработки данных и оригинальных алгоритмов объективной оценки сопоставления скелетонных спектров долгопериодных МГД колебаний в магнитосфере и за ее пределами. Особенностями скелетонов можно воспользоваться, сопоставляя отдельные фрагменты спектра по компонентам геомагнитного поля для разных станций и/или параметров околоземного космического пространства в интересующий момент времени. Важной особенностью метода является количественная оценка однотипности скелетонов. Фиксация однотипных скелетонов на разных геомагнитных обсерваториях в один момент времени свидетельствует о синхронизации колебаний на магнитосферных оболочках. Это обстоятельство позволяет классифицировать магнитосферные оболочки (с привязкой к магнитным станциям) на группы с разными механизмами генерации исследуемых колебаний, приняв во внимание общепринятые стандартные модели магнитосферы.

Подходы к решению научно-прикладной задачи краткосрочного прогноза солнечной вспышечной активности по ограниченным наземным данным опираются также на оригинальные методики. В основе исследования предложены объективные результаты сопоставления долгопериодных колебаний горизонтальной составляющей геомагнитного поля с сети обсерваторий в широких географических пределах в интервалы, предшествующие солнечным экстремальным вспышкам. Близость вейвлет-скелетонных спектров на разных обсерваториях в конкретные моменты времени свидетельствует об установлении общего гармонического режима и синхронизации колебаний горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Такие ситуации могут возникать для рассматриваемых периодов только под действием внешних факторов: электромагнитного или плазменного возмущений. Учитывая это обстоятельство, в исследовании выполнен поиск моментов синхронизации колебаний горизонтальной составляющей геомагнитного поля на всем широтном интервале рассматриваемых магнитных станций в течение пяти дней перед интенсивной вспышкой. Предложен оригинальный алгоритм сравнительного анализа скелетонных спектров с вычислением объективной характеристики регистрации моментов синхронизации колебательных режимов на всех станциях. Проверка надежности работы алгоритма выполнена на большом статистическом материале.

Вейвлет-анализ геомагнитных пульсаций на разных масштабах был выполнен для данных 20 экстремальных рентгеновских вспышек по пятидневным интервалам, предшествующим каждой вспышке. При этом использовались данные горизонтальной компоненты геомагнитного поля с минутным разрешением по пяти обсерваториям Leirvogur (LRV, 64.183°N/338.3°E), Kanoya (KNY, 31.424°N/130.88°E), Hatizyo (HTY, 33.073°N/139.825°E), Kakioka (KAK, 36.232°N/140.186°E), Memambetsu (MMB, 43.91°N/144.189°E) в широком диапазоне координат (геом. широта 31°-64°), полученные с ресурса http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp. Одновременно анализировались данные о мощности рентгеновского излучения и минутные данные о параметрах солнечного ветра – скорости потока, плотности, магнитуды межпланетного магнитного поля, предоставленные ресурсом http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr. Исследование каждого случая вспышки включало интервал наблюдений, содержащий 4,5 дня (6480 мин) до регистрации вспышки и 0,3 дня (500 мин) после. Таким образом, каждый анализируемый интервал содержал 6980 мин одновременных наблюдений геомагнитного поля, параметров солнечного ветра и мощности рентгеновского излучения. Основными критериями отбора таких событий были: 1) все анализируемые вспышки относились к экстремальному классу мощности X ($W>10^{-4}$ Вт/м^2); 2) в течение пятидневного интервала наблюдений отсутствовали геомагнитные возмущения типа бурь (|Dst|<100нТл), удовлетворяющих на этом интервале

причинно-следственным связям с такими вспышками. Согласно указанным критериям, было проанализировано 20 вспышек по данным каталога http://vso.nso.edu/cgi/catalogui. Даты анализируемых вспышек класса X: 07.09.2005, 16.07.2004, 02.11.2003, 28.10.2003, 19.10.2001, 23.07.2002, 13.12.2001, 17.03.2003, 26.02.2004, 07.11.2004, 24.09.2001, 03.08.2002, 06.04.2001, 28.12.2001, 29.03.2001, 31.10.2002, 09.06.2003, 15.06.2003, 13.08.2004, 30.10.2004.

Отмечено установление общего гармонического режима, характеризуемого вейвлет-скелетонными спектрами и синхронизации колебаний горизонтальной составляющей геомагнитного поля в определенные моменты времени на разных обсерваториях. Такие ситуации могут возникать для рассматриваемых периодов под действием внешних факторов: электромагнитного или плазменного возмущений. Действие ультрафиолетового или рентгеновского солнечного излучения способно изменять ионосферную проводимость и тем самым усиливать геомагнитные колебания. Учитывая это обстоятельство выполнен поиск моментов синхронизации колебаний горизонтальной составляющей геомагнитного поля на всем широтном интервале рассматриваемых магнитных станций в течение пяти дней перед интенсивной вспышкой. Мы предполагаем, что наличие участков синхронизации в указанный временной интервал выступает как предвестник возникновения вспышки. Интерпретация результатов сравнительного анализа скелетонных наборов, вычисленных на основе данных с указанных выше обсерваторий, усложняется большой продолжительностью интервала наблюдений. Для решения этой проблемы после вычисления скелетонных спектров и их сопоставления итоговая картина обработана гауссовым фильтром с высокой контрастностью, что отчетливо визуализирует корреляцию колебательных режимов на разных обсерваториях. Чтобы избежать субъективных суждений при анализе полученных скелетонных наборов, необходима численная оценка. Для этого нами предложен оригинальный алгоритм сравнительного анализа скелетонных спектров с вычислением объективной оценки моментов регистрации синхронизации колебательных режимов на всех станциях.

Выполнена проверка объективности полученных результатов при анализе 20 пятидневных интервалов в 2001-2005 гг., в течение которых не наблюдались солнечные вспышки классов M или X. Для этого в исследовании по предлагаемой методике для всех анализируемых невозмущенных интервалов и для каждого анализируемого масштаба колебаний были вычислены гистограммы распределения интенсивности группировок моментов 100% синхронизации регистрируемых колебаний на магнитных обсерваториях. Анализ показал, что ранее обнаруженные экстремумы здесь не отмечаются, что косвенно подтверждает валидность разрабатываемого в исследовании метода [Бархатов и др., 2016; Barkhatov et al., 2016]. Таким образом, по нашему мнению, единственной возможностью усиления колебаний геомагнитного поля и их синхронизации в широких географических пределах является увеличение ионосферной проводимости под действием солнечного ионизирующего электромагнитного излучения, опережающего вспышку, и как следствие – усиление ионосферных колебательных токовых систем. Колебания интенсивности этого излучения проявляются в геомагнитных пульсациях, начиная с периодов порядка и более часа, что можно связать с соответствующей инерционностью ионосферы [Barkhatov et al., 2004].

Параллельный анализ результатов постпроцессинга вейвлет-составляющих низкочастотных МГД возмущений параметров плазменных потоков солнечного ветра и возмущений горизонтальной компоненты геомагнитного поля диапазона геомагнитных колебаний, зарегистрированных вдоль меридиональной цепи станций во время различных по силе геомагнитных бурь, также является новым подходом к диагностике околоземного космического пространства. Такой метод применен в проекте при проверке гипотезы о

том, что в периоды геомагнитных бурь, вызываемых солнечными плазменными потоками, часть магнитных возмущений на земной поверхности связана с МГД возмущениями в этих потоках и проникает внутрь магнитосферы из солнечного ветра. Здесь так же применен новый метод оценки согласованности вейвлет спектров низкочастотных возмущений с применением скелетонной техники. При этом сопоставляются скелетонные спектры и вычисляются временные задержки между регистрируемыми магнитограммами и основными параметрами потока солнечного ветра, такими как скорость, плотность, давление, величина магнитного поля. Применение техники скелетонов к анализу основных параметров межпланетной среды позволило оценить время реакции магнитосферы в колебаниях горизонтальной компоненты геомагнитного поля на разных широтах на подошедшее к ней возмущение.

Данная часть исследования выполнена по ионосферным и магнитным данным станции Казань в интервале 1-15 сентября 2014 г. Этот интервал вначале был определен периодом работы нагревного стенда «СУРА». При этом использовались данные критической частоты ионосферного слоя F2 и H, E, Z компонент геомагнитного поля с минутным разрешением. В пределах рассматриваемого интервала имела место геомагнитная буря продолжительностью более трех суток (Dst до -75 нТл). Эта геомагнитная буря содержала фазу внезапного начала (SSC) длительностью 3 часа, главную фазу продолжительностью 4 часа (12 сентября 20.00UT - 13 сентября 00.00UT), и фазу восстановления длительностью более двух суток (13 сентября 00.00UT - 15 сентября 07.00UT). Естественно, в изучаемый сверхнизкочастотный колебательный процесс вовлекается вся магнитосфера, включая все точки магнитосопряженные району Казани. Это означает, что возмущение, зарегистрированное на станции Казань должно отмечаться и на других магнитных станциях, имеющих ту же долготу. Наиболее близкой по долготе к Казани станцией является обсерватория Port Alfred (46.4°S/51.8°E). В связи с этим, спектральному анализу были также подвергнуты H, E, Z компоненты геомагнитного поля, зарегистрированные на этой обсерватории с минутным разрешением.

Известно, что генерация магнитозвуковых колебаний в магнитосфере Земли может быть обусловлена вне и внутри магнитосферными источниками. Низкочастотные колебания такого диапазона, как уже отмечалось выше, наблюдаются в солнечном ветре и возникают в нем вследствие магнитогравитационной возмущенности, связанной с солнечной активностью. Возмущаемые при этом параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля могут быть ответственны за возникновение магнитосферно-ионосферных колебаний, которые также могут проявляться в синхронной возмущенности критической частоты слоя F2 и компонент геомагнитного поля. Поиск соответствующих возмущений скорости солнечного ветра, протонной концентрации, а также компонент Bx, By и Bz межпланетного магнитного поля в рассматриваемом диапазоне частот выполнен в пределах исследуемого временного интервала 1-15 сентября 2014 г. Факты синхронизации ионосферных и геомагнитных возмущений устанавливались при исследовании динамических Фурье-спектров критической частоты и компонент магнитного поля, а также с помощью анализа вейвлет-спектров внутримагнитосферных возмущений и возмущений, отмечаемых в солнечном ветре. В пределах рассматриваемого интервала имел место геомагнитоспокойный период с 1 по 11 сентября и появление возможных плазменных неоднородностей могло быть связано только с экспериментами по нагреву ионосферы мощным радиоизлучением на стенде «СУРА» в интервале с 4 по 12 сентября. Однако, поиск одновременных ионосферных и геомагнитных возмущений в рамках исследования динамических спектров критической частоты и компонент геомагнитного поля показал, что 3 сентября 2014 г в местное ночное время (00.00-02.00UT, 03.00-05.00LT) на динамическом спектре критической частоты слоя F2 отмечались серии возмущений с характерными частотами в диапазоне 0.3 до 4 мГц. Важным

обстоятельством является факт одновременного появления серий подобных возмущений в компонентах геомагнитного поля в том же диапазоне частот. Отметим, что в период работы нагревного стенда такая синхронизация зарегистрирована не была.

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 МЗ возмущенности, которая проявляется в суббуревое время и связана с вариациями Bz компоненты ММП.

3.9. Участие в научных мероприятиях по тематике Проекта за период, на который предоставлен грант (каждое мероприятие с новой строки, указать названия мероприятий и тип доклада)

1) 39 ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 2-6 марта 2016 г., ПГИ РАН, г. Апатиты, Мурманской обл., участие с докладом, постер
2) Всероссийская конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), участие с докладом, постер
3) Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3-7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, участие с докладом, постер
4) 40 ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, г. Апатиты, Мурманской обл., участие с докладом, постер
5) XXI научная конференция по радиофизике, г. Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, участие с докладом
6) Научный семинар, западное отделение (филиал) ИЗМИРАН, доклад «Геомагнитные предвестники экстремальных солнечных вспышек», 24 ноября 2017 г.

3.10. Участие в экспедициях по тематике Проекта, за период, на который предоставлен грант (указать номера проектов)

-

3.11. Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по данному проекту, например, http://www.somewhere.ru/mypub.html

http://spacelab.mininuniver.ru/?page_id=710

3.12. Краткое назначение конечной продукции, технологии или услуг, которые будут производиться с применением полученных результатов

Прикладные результаты выполненной работы применимы для оценки негативного воздействия солнечной активности на коммуникации наземного и космического базирования, поскольку полученные результаты можно использовать для прогнозирования мощных солнечных вспышек и геомагнитных бурь. Это в свою очередь позволяет предложить рекомендации по минимизации последствий такого воздействия. Практическая ценность отмечаемой синхронной регистрации УНЧ вариации геомагнитного поля и ионосферной плазмы, отражающей процесс взаимодействия МГД волн солнечного ветра с магнитосферной плазмой, заключается получении информации о состоянии околоземного космического пространства, которая может быть использована

при создании дистанционных диагностических методов и инструментов. В связи с этим, целевыми организациями, заинтересованными в использовании результатов работы проекта, являются: Министерство РФ по чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС); Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (Росгидромет).

3.13. Библиографический список всех публикаций по Проекту, опубликованных за период, на который предоставлен грант, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.

1. Бархатов Н.А., Обридко В.Н., Ревунов С.Е., Снегирев С.Д., Шадруков Д.В., Шейнер О.А. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как предвестники солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия, Т.56, № 2, С. 265–272, 2016
2. Barkhatov N. A., Obridko V. N., Revunov S. E., Snegirev S. D., Shadrukov D. V., and Sheiner O. A. Long Period Geomagnetic Pulsations as Solar Flare Precursors // ISSN 0016_7932, Geomagnetism and Aeronomy, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 249–255. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.
3. Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия, 2017, том 57, № 3, с. 273–279
4. N.A. Barkhatov, V.G. Vorobev, S.E. Revunov, and O.I. Yagodkina Effect of Solar Dynamics Parameters on the Formation of Substorm Activity // Geomagnetism and Aeronomy, 2017, Vol. 57, No. 3, pp. 251–256. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017
5. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Гелиогеофизнческие приложения современных методов обработки цифровых данных: монография. М.: ФЛИНТА. Нижний Новгород: Мининский университет, 2017. 316 с.
6. 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. 58-66, UDC 550.388.2 DOI: 10.12737/szf-33201701
7. 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. 63-73
8. Манакова Ю.В., Пехтелева К.А., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Пространственно-временной анализ возмущений диапазона Pc4-5 в периоды магнитных бурь корреляционно-скелетонным методом // Вестник Мининского университета, № 1, 2016, 1-6
9. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента // Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, P. 27-30, 2016
10. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В., Виноградов А.Б. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, P. 74-77, 2016
11. Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Главацкий Ю.А. Учет геомагнитного поля при распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере // Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, P. 104-107, 2016
12. 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

13. 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
14. 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
15. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 29 февраля-4 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.14-15. 2016
16. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В., Виноградов А.Б. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 29 февраля-4 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.15-16. 2016
17. Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Главацкий Ю.А. Учет геомагнитного поля при распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 29 февраля-4 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.40-41. 2016
18. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б., Романов Р.В. Суббуревая геомагнитная активность, связанная с элементами магнитных облаков. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), С.10. 2016
19. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), С.11. 2016
20. Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B., Romanov R.V., Yagodkina O.I. Geomagnetic activity structures of magnetic clouds. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 28-29. 2016
21. Barkhatov N.A., Yagodkina O.I., Revunov S.E., Vorobjev V.G. Solar wind driving and formation of substorm activity. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 29. 2016
22. Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V., Yagodkina O.I. The magnetosonic waves in the mid-latitude ionosphere appeared within preparation phase of strong earthquakes. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 223. 2016
23. 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
24. 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

25. 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
26. 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
27. 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
28. 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

3.14. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Рациональное природопользование

3.15. Критическая технология РФ, которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения

3.16. Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями, включая ГЛОНАСС и программу развития наземной инфраструктуры

3.17. Направление из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации

Противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства