

*На правах рукописи*



**Ревунов Сергей Евгеньевич**

**КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И  
МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНАЯ АКТИВНОСТЬ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Нижний Новгород, 2008 г.**

Работа выполнена в Нижегородском государственном педагогическом университете.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор Бархатов Николай Александрович

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор Деминов Марат Гарунович  
кандидат физико-математических наук Ягодкина Оксана Ивановна

**Ведущая организация:**

Объединенный институт физики Земли РАН, (ОИФЗ), г. Москва

Защита диссертации состоится **« 2 » декабря 2008 г. в 16 часов 00 мин.** на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 в Учреждении Российской Академии наук Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН по адресу: 142190, г. Троицк, Московской области (проезд автобусом №398 от станции метро «Тёплый стан» до остановки «ИЗМИРАН»).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан **«31» октября 2008 г.**

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.237.01

доктор физико-математических наук:

 /Михайлов Ю.М./

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Общая характеристика работы**

В диссертации рассматриваются конкретные задачи определения связи геомагнитной и ионосферной активности с динамикой параметров межпланетной среды. Это связь Dst-вариации геомагнитного поля с крупномасштабными структурами в солнечном ветре, источниками которых являются физические процессы на Солнце – вспышки, корональные дыры, активизировавшиеся волокна (протуберанцы), корональные выбросы вещества и их сочетания. Рассматривается также связь критической частоты  $f_0F2$  среднеширотной ионосферы с параметрами солнечного ветра и проводится анализ особенностей спектрального состава высокоширотных геомагнитных вариаций в зависимости от их пространственного положения в полярной шапке, авроральной и субавроральной зонах. Выше указанные исследования выполнены с использованием метода искусственных нейронных сетей.

### **Актуальность проблемы**

Анализ связи геомагнитной и ионосферной активности с параметрами межпланетной среды, выполненный исследователями за период после выхода спутников в межпланетное пространство, позволил создать концепцию взаимодействия солнечного ветра с земной магнитосферой и разработать модели, позволяющие описывать пространственно-временные распределения магнитного поля, электрического поля, электрического тока и плазменных доменов в околоземном пространстве. Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) являются входными параметрами таких моделей. Достигнутые за последние десятилетия результаты такого анализа используются для контроля и прогноза электромагнитного состояния магнитосферы Земли в периоды проведения геофизических наблюдений и для борьбы с негативным влиянием космической погоды на работу космических и наземных технических систем. Классификация значительных по энергетике геомагнитных возмущений, на основе связи этих возмущений с конкретным солнечным источником выброса плазмы, которая является их генератором в результате ее взаимодействия с земной магнитосферой, может раскрыть природу многообразия регистрируемых форм Dst-вариаций геомагнитного поля и таких параметров магнитосферных бурь, как их интенсивность и длительность. На основе параметров

околоземного космического пространства построены и соотношения, с помощью которых проводятся оценки размеров полярной шапки и овала полярных сияний. В настоящее время исследования по поиску причинно-следственных связей между параметрами околоземной среды и магнитосферно-ионосферной реакцией на их изменение, составляют самостоятельное направление в геофизических исследованиях. Современная техника обработки массивов данных, которые включают в себя параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также индексы геомагнитной активности, позволяет на основе метода искусственных нейронных сетей (ИНС) проводить классификацию событий генерации магнитосферных возмущений. В результате возникает возможность совершенствовать модели взаимодействия магнитосферы Земли с потоками солнечной плазмы, включая зависимость параметров возникающих возмущений от конкретных источников потоков.

Еще одно направление космических исследований получило развитие по мере накопления спутниковой информации о солнечной активности и состоянии межпланетной среды. Это обнаружение и идентификация разрывов параметров космической плазмы, таких как ударные волны, тангенциальные, контактные или вращательные разрывы. Исследование разрывов позволяет уточнить макроструктуру солнечного ветра и связать их с процессами, происходящими на Солнце. Использование метода ИНС для разделения скачков в параметрах космической плазмы и магнитного поля позволяет провести классификацию, отвечающую известным типам магнитогидродинамических разрывов. Одновременно появляется возможность разработать алгоритм определения ориентации поверхностей разрывов по одномерным наблюдениям скачков параметров солнечного ветра на космических аппаратах.

Высокоширотная область пространства планеты характеризуется присутствием в ней наиболее мощных магнитосферно-ионосферных токовых систем, создающих здесь регулярные значительные геомагнитные возмущения. Структура силовых линий геомагнитного поля и структура высыпаний энергичных частиц в этой области выявили в ней наличие специфических районов, получивших следующие названия – область полярной шапки, область полярного овала (авроральная зона), субавроральная зона, внутри каждой из которых присутствует своя специфика наземных геомагнитных вариаций, электрического поля и тока в ионосфере. Размеры первых двух областей (зон) не остаются постоянными и во время значительных магнитосферных возмущений их южные границы смещаются в сторону средних широт. Для контроля динамики местоположения

авроральной зоны в настоящее время используют радарные данные и фотометрические измерения полярной области, ведущиеся с помощью космических аппаратов. Делаются попытки контролировать границы этих зон по геомагнитным данным. Получение информации о текущих размерах указанных зон необходимо для модельного описания энергетического бюджета магнитосферы и пространственно-временного распределения магнитного поля в ней.

В настоящее время одновременно с развитием радиосвязи с использованием космических аппаратов продолжается использование коротковолновой (КВ) радиосвязи через среднеширотную ионосферу. Для повышения надежности такой радиосвязи необходимо совершенствование оперативного прогнозирования ионосферных параметров на время от 30 мин до нескольких часов. Оно может быть осуществлено на основе прогнозирования критической частоты ионосферного слоя F2 на различные интервалы времени с помощью ИНС с учетом геофизических параметров.

Диссертация направлена на решение отдельных задач внутри указанных актуальных проблем.

На основе метода искусственных нейронных сетей в ней проведена классификация событий генерации магнитосферных возмущений. Представлена методика определения пространственного положения высокоширотных зон геомагнитной активности: полярной шапки, аврорального овала и субавроральной зоны по данным Гренландской цепочки магнитных станций. Принадлежность конкретной обсерватории к одной из указанных выше зон высокоширотного пространства определяется на основе работы самообучающейся искусственной нейронной сети типа слоя Кохонена. Входными параметрами для расчета служат амплитудно-частотные спектры и матрицы вейвлет-коэффициентов компонент геомагнитного поля.

Выполнено исследование связи основных параметров ионосферного коротковолнового радиоканала – максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) ионосферного распространения КВ радиосигнала и критической частоты  $f_0F2$  среднеширотной ионосферы с геоэффективными параметрами межпланетной среды.

### **Цели и задачи работы**

Цель работы состоит в установлении связи конкретных параметров магнитосферной и ионосферной активности с пространственно-временной динамикой параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. При этом осуществляется учет солнечных

источников, которые являются генераторами параметров межпланетной среды, регистрируемых космическими аппаратами вблизи земной магнитосферы. Решаются следующие задачи:

1. Исследование возможности выполнения классификации вариаций индекса геомагнитной активности Dst в периоды магнитосферных возмущений в зависимости от вызывающего их солнечного источника на основе сопоставления глобальной магнитосферной активности с крупномасштабными структурами в солнечном ветре (спутниковые данные) вызываемых физическими процессами на Солнце (вспышки, корональные дыры, волокна, корональные выбросы вещества и их сочетания).
2. Сопоставление спектральных характеристик геомагнитных вариаций, регистрируемых на магнитных станциях в области высоких широт, с целью проверки возможности на этой основе определить пространственную динамику положения конкретной станции в одной из зон геомагнитной активности – полярная шапка, овал полярных сияний, субавроральная зона.
3. Анализ связи максимально наблюдаемой и критической частоты ионосферного распространения коротковолнового радиосигнала с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля для повышения надежности ионосферной КВ радиосвязи.

### **Научная новизна**

Применение метода искусственных нейронных сетей для классификации Dst-вариаций геомагнитного поля помогло выявить характерные особенности в реакции геомагнитного поля на приход к Земле солнечных возмущений конкретной природы: вспышки, корональные дыры, волокна, корональные выбросы вещества и их сочетания. Анализ полученных результатов позволил отождествить каждый выделенный класс с конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

На основе одножидкостного магнитогидродинамического подхода с применением технологии искусственных нейронных сетей разработана методика автоматического разделения скачков в регистрируемых параметрах космической плазмы и магнитного поля на классы, отвечающие известным типам разрывов. Для этого была разработана классификационная ИНС вида «слой Кохонена» и выполнена классификация скачков параметров зарегистрированных на КА WIND в 1996-1999 гг. по двум разным алгоритмам.

Для разрывов установленных классов определены ориентации плоскостей их поверхностей в трехмерном пространстве на основе одномерных наблюдений. Также проведено специальное исследование эволюционности найденных ударных волн.

С целью установления пространственного положения характерных полярных областей (полярная шапка, полярный овал, субавроральная зона) по данным Гренландской цепочки магнитных станций, создана методика классификации амплитудно-частотных спектров и матриц вейвлет-коэффициентов по данным этих станций. Принадлежность местоположения отдельной станции к одной из трех указанных областей положена в основу выполняемой классификации. Классификация выполнена на основе работы самообучающейся искусственной нейронной сети типа слоя Кохонена. Разработан алгоритм обработки результатов классификации для наименования полученных классов.

Разработан алгоритм прогнозирования на интервал 0,5-3 часа максимально наблюдаемой и критической частоты на основе технологии искусственных нейронных сетей. Методика прогнозирования применена к данным наклонного зондирования на трассе Inskip (Англия) – Ростов-на-Дону, которые получены для различных геофизических условий. Определены характерные времена ионосферной реакции на изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, определяющих последовательность развития магнитосферно-ионосферных возмущений, приводящих к изменениям КВ радиосвязи.

### **Научная и практическая ценность**

На основе известных алгоритмов Кохонена разработана самообучающаяся искусственная нейронная сеть, позволяющая проводить классификацию геомагнитных возмущений на основе входных данных, которыми являются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля вблизи земной магнитосферы. Итоговая классификация отражает связь геомагнитной активности не только с амплитудой входных параметров, но и с типом солнечного источника, породившего данную структуру солнечного ветра. В результате проведения численных экспериментов удалось выделить основные классы комплексов возмущенных параметров межпланетной среды, отвечающих разным магнитосферным возмущениям, характеризующимися конкретными видами (конфигурациями) Dst-вариации геомагнитного поля. Таким образом, получена возможность контролировать солнечную природу регистрируемой конфигурации Dst-вариации.

На основе самообучающейся искусственной нейронной сети типа слоя Кохонена выявлена возможность контролировать местоположение высокоширотного пункта геомагнитных измерений в одной из зон геомагнитной активности – полярной шапке, овале полярных сияний, субавроральной зоне по данным Гренландской цепочки магнитных станций. Изменение местоположения связано с динамикой структуры магнитного поля магнитосферы в результате ее взаимодействия с солнечным ветром. Входными параметрами для расчета местоположения пункта геомагнитных измерений служат амплитудно-частотные спектры и матрицы вейвлет-коэффициентов анализа геомагнитных данных. Данный способ контроля может быть использован для оценки размеров полярной шапки и овала полярных сияний на основе геомагнитных измерений. Именно эти размеры характеризуют энергетику магнитосферы, и они используются в качестве входных параметров в различных моделях, описывающих магнитное поле в ней.

На основе анализа данных наклонного зондирования с использованием линейно-частотной модуляции (ЛЧМ), полученных на трассе Inskip (Англия) – Ростов-на-Дону, установлена связь максимально наблюдаемой и критической частоты с изменениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, определяющих последовательность развития магнитосферно-ионосферных возмущений, что приводит к изменению условий КВ радиосвязи. Практическая ценность выполненной работы заключается в применении ее результатов для повышения надежности ионосферной КВ радиосвязи.

### **Степень достоверности полученных результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов систематически проверялась и подтверждалась путём сравнения результатов вычислений и анализа с опытными данными и данными других авторов.

### **Экспериментальные данные**

В диссертационном исследовании использовались следующие экспериментальные данные:

1. Параметры солнечного ветра и ММП с разным усреднением, полученные из базы спутниковой системы OMNI [<http://www.ngdc.noaa.gov>]
2. Данные по индексам глобальной геомагнитной активности [<http://www.ngdc.noaa.gov>; [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public); <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>]
3. Данные по состоянию ионосферного слоя F2, предоставленные НИРФИ



4. Данные о состоянии межпланетной среды, полученные с космических аппаратов (КА) Wind и Ace [<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/rtsw.html>; [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public)]
5. Данные о состоянии межпланетной среды, полученные из базы SPIDR [<http://clust1.wdcb.ru/spidr/index.jsp>]
6. Данные по разрывам параметров межпланетной среды, предоставленные ИКИ РАН.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Классификация Dst-индекса на основе параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, относящихся к конкретным явлениям солнечной активности: вспышки, корональные дыры, волокна, корональные выбросы вещества и их сочетания; классификация разрывов в межпланетной плазме на основе метода нейронных сетей и определение трехмерных ориентаций их плоскостей на основе одномерных спутниковых наблюдений.
2. Спектральные характеристики высокоширотных геомагнитных вариаций в периоды магнитосферных возмущений, характеризующие их пространственную принадлежность к одной из трех зон геомагнитной активности: полярная шапка, овал полярных сияний, субавроральная зона.
3. Временной масштаб реакции критической частоты  $f_0F2$  ионосферы и максимально наблюдаемой частоты коротковолнового радиосигнала при наклонном ионосферном зондировании на динамику изменения параметров межпланетной среды вблизи земной магнитосферы определенный на основе нейросетевой технологии.

**Представление результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. IX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь», 22-24 апреля 2003 г., Воронеж
2. XXIII General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003
3. VIII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины, 20-25 апреля 2003 г., Дзержинск
4. Десятая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, 1-7 апреля 2004 г., Москва

5. European Geosciences Union, General Assembly, Nice, France, 25-30 April 2004
6. III Международная конференция «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», 16-21 августа 2004, Институт космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН (с. Паратунка, Камчатская обл.)
7. Международная конференция «Солнечно-земная физика», Иркутск, 20-25 сентября 2004 г.
8. Семинар «Физика авроральных явлений», 1-4 марта 2005 г., Полярный геофизический институт
9. 21 Всероссийская конференция по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 24-27 мая 2005 г.
10. 10th IAGA Scientific Assembly, Toulouse-France, July 18-29, 2005
11. 9th Asian-Pacific Regional International Astronomical Union (IAU) Meeting (APRIM-2005), Bali, Indonesia, 26-29 July 2005
12. Всероссийская конференция «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности» (10-15 октября 2005 г., г. Троицк)
13. XXVIII URSI General Assembly New Delhi, India, 23 to 29 October 2005
14. 29 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 27 February-3 March 2006, PGI KSC RAS
15. XI Нижегородская сессия молодых ученых. Математические науки, 22-25 мая 2006 г., Нижний Новгород
16. 36th COSPAR SCIENTIFIC ASSEMBLY, Beijing, China, 16-23 July 2006
17. 11 Пулковская международная конференция по физике Солнца «Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений», ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 2-7 июля 2007
18. European Geosciences Union, General Assembly 2007, Vienna, Austria, 15-20 April 2007
19. 31 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 26-29 February 2008, PGI KSC RAS
20. European Geosciences Union, General Assembly 2008, Vienna, Austria, 13-18 April 2008
21. Семинары НИРФИ, ИЗМИРАН и НГПУ

## **Публикации**

По теме диссертации автором опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах и 27 работ в сборниках и трудах конференций.

## **Личный вклад соискателя**

Автор принимал непосредственное участие в постановке задач и выборе методов их решения, в получении и анализе результатов, а также в их интерпретации. Им проведены все численные эксперименты, представленные в диссертации, выполненные с использованием самостоятельно разработанных компьютерных программ.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 123 страницы, 44 рисунка, 2 схемы и 5 таблиц. Библиография включает в себя 100 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены основные цели исследования, кратко описаны методы исследований, использованные в диссертации, приведен обзор содержания работы.

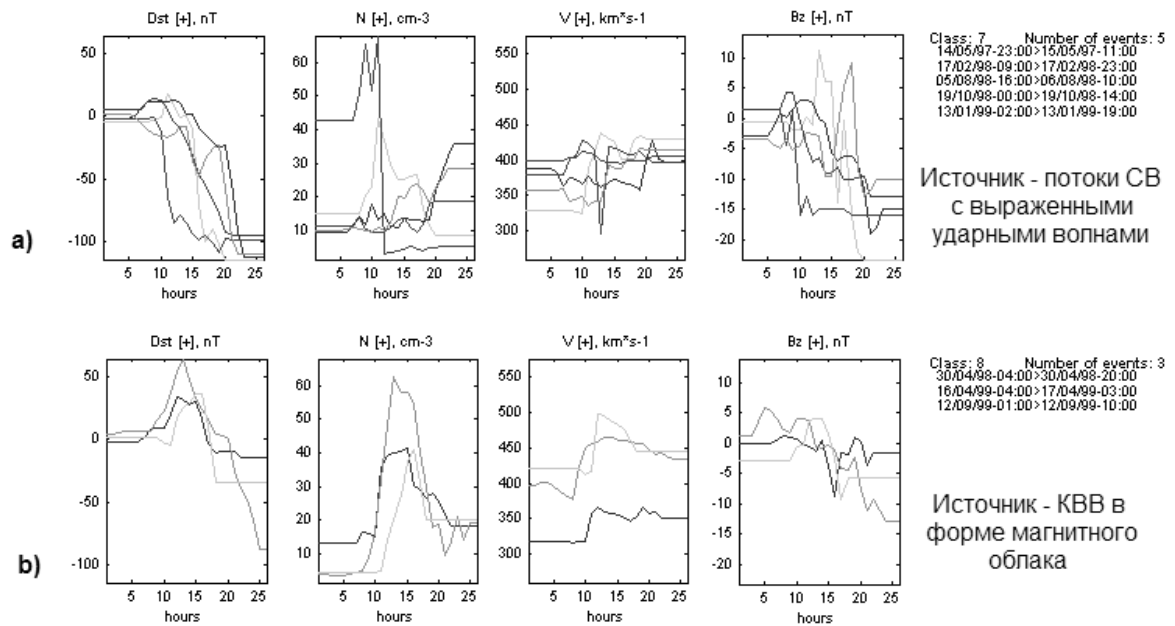
**В первой главе** диссертации представлен обзор крупномасштабных явлений солнечной активности и влияния параметров межпланетной среды на геомагнитную и ионосферную активность, указаны современные подходы к решению отдельных геофизических задач, связанных с использованием информации о параметрах межпланетной среды. В первом параграфе приведено описание наиболее геоэффективных проявлений солнечной активности и указаны основные свойства таких проявлений, как вспышки, волокна, корональные дыры, корональные выбросы вещества (КВВ). Вторым параграфом посвящен количественному описанию геомагнитной активности и сценариям развития геомагнитных возмущений в области средних и высоких широт. В третьем параграфе указаны современные подходы к решению отдельных геофизических задач, таких как построение трехмерных картин геоэффективных структур в межпланетном пространстве с привлечением данных нескольких космических аппаратов, применение вейвлет-анализа, использование нелинейного корреляционного инструмента – искусственных нейронных сетей. В четвертом параграфе описывается постановка задач, решаемых в диссертации.

**Вторая глава** посвящена исследованию возможности создания комплексной классификации планетарных геомагнитных возмущений с привлечением данных о параметрах межпланетной среды. Первый параграф посвящен описанию вариаций геомагнитных возмущений, описываемых Dst индексом геомагнитной активности. Во втором параграфе представлена используемая архитектура нейронной сети и описан алгоритм ее обучения и работы. Используется нейронная сеть, именуемая слоем Кохонена.

В третьем параграфе проводится классификация геомагнитных возмущений, характеризующихся индексом геомагнитной активности Dst, с привлечением данных о концентрации плазмы солнечного ветра, ее скорости и вертикальной составляющей вектора межпланетного магнитного поля. Концентрация и скорость плазмы характеризуют кинетическое давление солнечного ветра, а вертикальная  $V_z$  компонента межпланетного магнитного поля является наиболее геоэффективным параметром, от знака и амплитуды которой зависит поток энергии внутрь магнитосферы из межпланетной среды: при  $V_z < 0$  поток усиливается. Для проведения классификации используется метод ИНС, который позволяет выявить новые и уточнить уже установленные закономерности связи параметров геомагнитной возмущенности с параметрами солнечной активности. Этот метод является новым количественным подходом к оценке геомагнитной активности и выделения классов электромагнитного состояния околоземной среды. В результате его применения формируются классы космической погоды.

В четвертом параграфе экспериментально устанавливается число классов событий космической погоды наиболее адекватное для данной задачи классификации, а в пятом проводится отождествление полученных классов с вызвавшими их явлениями солнечной активности. Классификация выполнялась по набору параметров: Dst, N, V,  $V_z$ . Данный набор отвечает физической сути задачи, моделируя причинно-следственные связи. Этим демонстрируется возможность объединения параметров, характеризующих причины (источники солнечной активности и структура солнечного ветра) и следствие (геомагнитное возмущение, представляемое Dst(t) вариацией). Таким образом описывается взаимодействие подошедшего потока солнечной плазмы с магнитосферой.

На Рис. 1, в качестве примера, приведены два из восьми найденных классов, выделенных с помощью разработанного метода классификации. Показаны относящиеся к этим классам конфигурации индекса Dst(t), концентрации плазмы солнечного ветра N(t), скорости солнечного ветра V(t) и вертикальной компоненты вектора ММП  $V_z(t)$ .

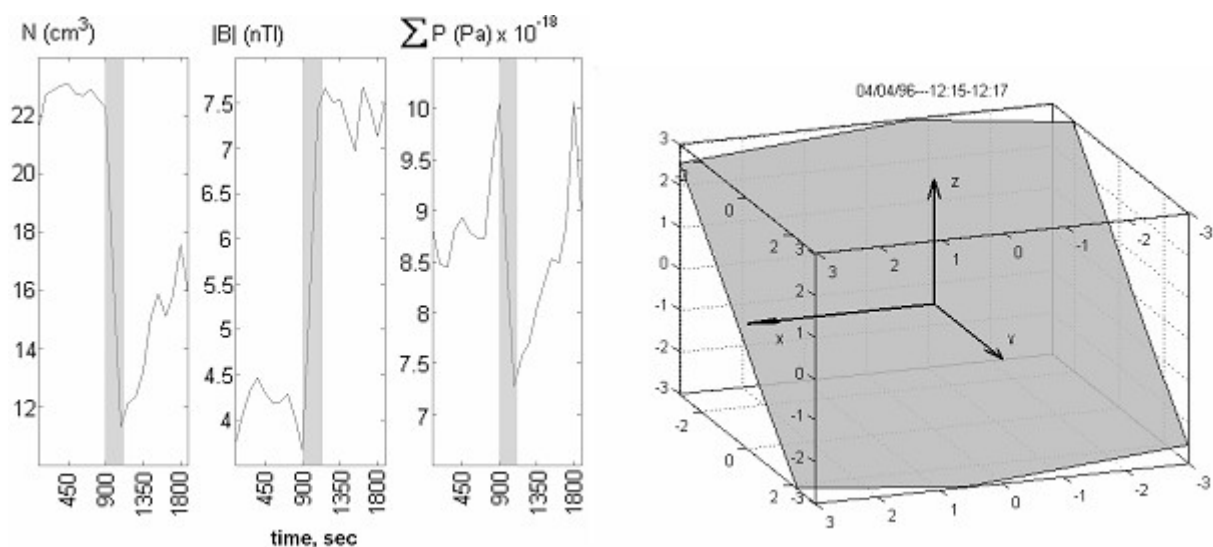


**Рис. 1.** Классы различных сильных магнитных бурь, вызванных разными источниками – ударными волнами (**a**) и КВВ в форме магнитных облаков (**b**).

Заметим, что разделение приведенных классов выполнено не только на основе амплитуды индекса Dst, но и с учетом формы, т.е. динамики Dst-вариации: на Рис. 1a индекс имеет отчетливый провал, а на Рис. 1b провалу предшествует повышение. Участвующие в классификации параметры N, V и Bz так же имеют свои уникальные особенности внутри класса, на основе которых можно сделать вывод о солнечном источнике. Так, колебания скорости с повышением, рост плотности и напряженности ММП на фоне невозмущенного солнечного ветра указывают на наличие ударной волны в потоке (см. Рис. 1a), а волновые возмущения в записях ММП совместно с ростом скорости потока и наличием пика плотности могут соответствовать магнитному облаку (см. Рис. 1b). Таким образом разработан комплексный подход к изучению геомагнитных возмущений как следствия солнечно-земных связей. Комплекс событий космической погоды (отклонения параметров солнечного ветра и ММП от фоновых значений и последующие изменения в индексе Dst) является основой новой классификации геомагнитных возмущений содержащей их причину. Классифицируются не просто типы возмущений в солнечном ветре и амплитуда индекса Dst, а события в совокупности по схеме «причина+следствие».

В шестом параграфе приводятся результаты классификации экспериментально обнаруженных на космическом аппарате, находящемся в солнечном ветре, скачков параметров на классы, отвечающие известным типам магнитогидродинамических разрывов. Проведение классификации, а также ее интерпретация потребовали разработки методики проведения численных экспериментов, которая содержала два сценария

(алгоритма), подробно описанных в этом параграфе. Здесь также содержится описание алгоритма для определения ориентаций поверхностей изучаемых разрывов по одномерным наблюдениям скачков параметров. На Рис. 2, в качестве примера, показана временная динамика измеренных параметров солнечного ветра (концентрация, модуль вектора ММП, давление) для события 04/04/96 (тип ударная волна) и найденная плоскость поверхности разрыва для зафиксированного скачка параметров.

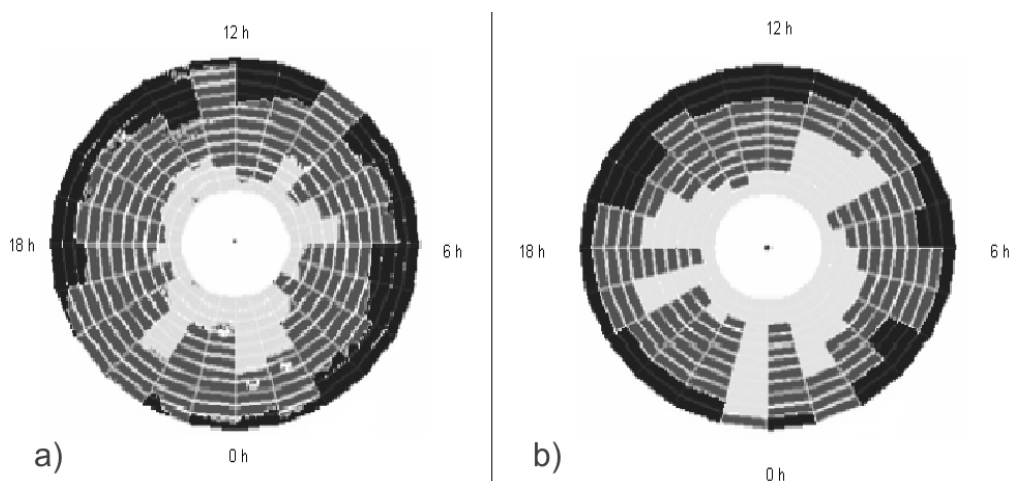


**Рис. 2.** Параметры события 04/04/96 типа ударная волна, полученные на основе измерений на КА (а); его расчетная плоскость разрыва в солнечно-эклиптической системе координат SE в условных единицах (б).

Седьмой параграф содержит результаты исследования по поиску оценки связи Кр индекса геомагнитной активности с электрическим полем солнечного ветра  $E_{sw}$  и с проекцией этого поля на геомагнитный диполь. Показано, что для всех исследуемых лет, суммарно по сезонам года, максимум классического коэффициента корреляции  $R(Kp, VB_s)$ , где  $V$  – скорость солнечного ветра, а  $B_s$  – южная компонента вектора ММП, наблюдается для интервалов осеннего и весеннего равноденствия и равен 0,52. Многофакторный коэффициент корреляции  $F(Kp, E_{\perp sw}, E_{\parallel sw})$ , где  $E_{\perp sw}$  – компонента вектора электрического поля солнечного ветра, перпендикулярная геомагнитному диполю, а  $E_{\parallel sw}$  – компонента, параллельная ему, максимален для летнего периода (0,48) и минимален для зимнего (0,38). Подтвержденный нами максимум сезонного изменения коэффициентов корреляции свидетельствует о влиянии ориентации электрического поля солнечного ветра относительно земного магнитного диполя на состояние геомагнитной активности. При этом результаты распределения уровня корреляции по сезонам наиболее резко

проявляются при представлении  $E_{sv}$  в системах координат, связанных с геомагнитным диполем – в солнечно-магнитосферной (SM) и солнечно-магнитной (SMAG).

**В третьей главе** содержатся результаты анализа возможности использования спектральных особенностей высокоширотных геомагнитных вариаций, регистрируемых широтной сетью магнитных станций, для контроля динамики их местоположения в одной из высокоширотных областей: в полярной шапке, овале полярных сияний, в субавроральной зоне. В первом параграфе обсуждается важность контроля динамики размера полярной шапки и аврорального овала. В двух следующих параграфах содержится описание разработанной методики классификации пространственного положения высокоширотной станции в одной из этих областей. Эта методика основана на выделении из регистрируемых станцией геомагнитных данных, особенностей временной структуры геомагнитных вариаций. Используется самообучающаяся искусственная нейронная сеть типа слоя Кохонена. Входными параметрами для расчета служат амплитудно-частотные спектры и матрицы вейвлет-коэффициентов компонент геомагнитного поля. В качестве примера на Рис. 3 приведены результаты классификации спектров модуля измеряемого вектора геомагнитного поля, что позволяет определить динамику размера полярного овала для конкретного дня.



**Рис. 3.** Результат классификации на три класса спектров модуля геомагнитного поля за 26 августа 1998 года. Представлен вид со стороны северной полярной шапки. Точкой в центре отмечен геомагнитный полюс Земли. **а)** – овал, определяемый на основе его современной модели DMSP; **б)** – овал, определяемый на основе классификации спектров модуля поля.

Каждый сегмент на рисунке соответствует определенной станции. Цветом показаны три выделенных класса. Темные сегменты-станции соответствуют среднеширотной зоне (класс 1), серые – овалу полярных сияний (авроральная зона, класс 2) и светлые –

полярной шапке (полярная зона, класс 3). Вычисляя коэффициент подобия, учитывающий площадь сравниваемых частей сегментов и их относительное расположение, было получено, что согласованность сетки-ответа нейронной сети с сеткой модельной авроральной зоны для разных дней составила 61-65%.

В четвертом параграфе предлагается алгоритмическая обработка результатов классификации. Проводится количественная оценка уровня согласованности классификационного и традиционного модельного подходов - сопоставляются результаты алгоритмической классификации с аналитическими вычислениями положения южной границы овала на основе спутниковых измерений высыпания частиц и эмпирических моделей. На основе этой оценки сделан вывод, что контроль положения южной границы овала, осуществляемый на основе геомагнитных данных Гренландской цепочки станций, может проводиться в реальном масштабе времени наряду с другими современными методами такого контроля. Он может быть наиболее полезен в периоды времени, когда отсутствуют спутниковые наблюдения.

В пятом параграфе выполнен поиск физических причин разделения спектральных характеристик магнитных возмущений в полярных областях. Показано, что в спектрах станций, принадлежащих разным зонам, присутствуют характерные пики частот. Так, в авроральной зоне отмечен пик на частоте  $7,5 \cdot 10^{-3}$  Гц. Данная частота соответствует плазменным колебаниям – устойчивым пульсациям Pc4. Амплитуда таких пульсаций обычно возрастает с приближением к зоне полярных сияний. В субавроральной зоне обнаружен пик на частотах  $0,7-1,1 \cdot 10^{-3}$  Гц. Этот низкочастотный пик согласно установившемуся мнению может быть вызван собственными колебаниями замкнутых силовых линий магнитного поля Земли. Выполненный корреляционный анализ спектров геомагнитного поля на станциях, отнесенных ИНС к полярной шапке, и спектров ММП в солнечном ветре показал их высокую согласованность (корреляция до 0,96). Это дает основание полагать, что за вариации в полярной шапке ответственны колебания в солнечном ветре. Таким образом при работе нейронная сеть устанавливает спектральные особенности вариаций геомагнитного поля, измеренного меридиональной цепью наземных станций, и делает вывод о принадлежности станции к той или иной полярной области. Далее на этой основе нейросеть выполняет оценку границ полярной шапки и аврорального овала.

**Четвертая глава** посвящена исследованию среднеширотной ионосферы. Рассмотрена связь максимально наблюдаемой и критической частоты слоя F2 с



параметрами околоземного космического пространства. В первом параграфе приводятся результаты базового корреляционного исследования связи частот с наиболее геоэффективными параметрами межпланетной среды. Во втором параграфе представлены результаты анализа временного шага между временем наблюдения параметров межпланетной среды и прогнозируемым временем начала использования этой частоты. Вычисление корреляции критической частоты  $f_0F2$  и максимально наблюдаемой с параметрами межпланетной среды необходимо для обоснования использования при обучении ИНС дополнительных солнечно-земных параметров. При этом учитывается задержка на время переноса возмущения в солнечном ветре от КА до магнитосферы и на время реакции магнитосферы на изменение ПСВ. Так, в результате проведенного корреляционного анализа, была установлена оптимальная задержка, при которой достигаются максимальные коэффициенты корреляции, равная трем часам. Перенос возмущенных параметров солнечного ветра и ММП от патрульного КА до границ магнитосферы занимает в среднем 50-60 мин (по данным Space Science Center, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, <http://www-ssc.igpp.ucla.edu>). Согласно установившимся представлениям оставшиеся два часа тратятся на разогрев нейтральной атмосферы вследствие джоулевых потерь под действием вновь пришедших и выпавшихся частиц. Данная задержка связана с инерцией атмосферы. На высотах больше 250 км (высота слоя F2 – 300-400 км) скорость химической рекомбинации ионов сравнима со скоростью их диффузии в нейтральном газе и механизмы переноса (диффузия) начинают влиять на величину ионной и электронной концентрации. С ростом высоты диффузия становится все более значительной. Таким образом, джоулев нагрев в области полярных сияний приводит к изменению состава среднеширотной ионосферы. При этом преобладающими первичными ионами в области F становятся ионы

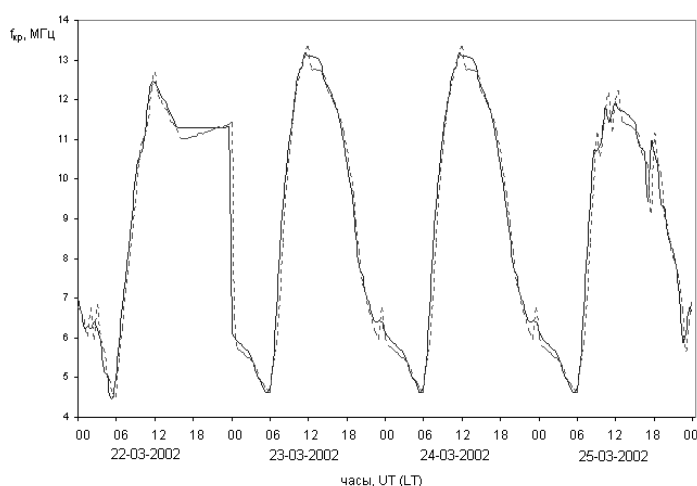
$O^+$ :  $\begin{matrix} \subseteq O^+ + O_2 & O_2^+ + O \\ \subseteq O^+ + N_2 & NO^+ + N \end{matrix}$ . Кроме того, протекают многие другие реакции, однако,

приведенные показывают, как могут образоваться ионы  $NO^+$  и  $O_2^+$ , являющиеся наряду с  $O^+$  наиболее многочисленными.

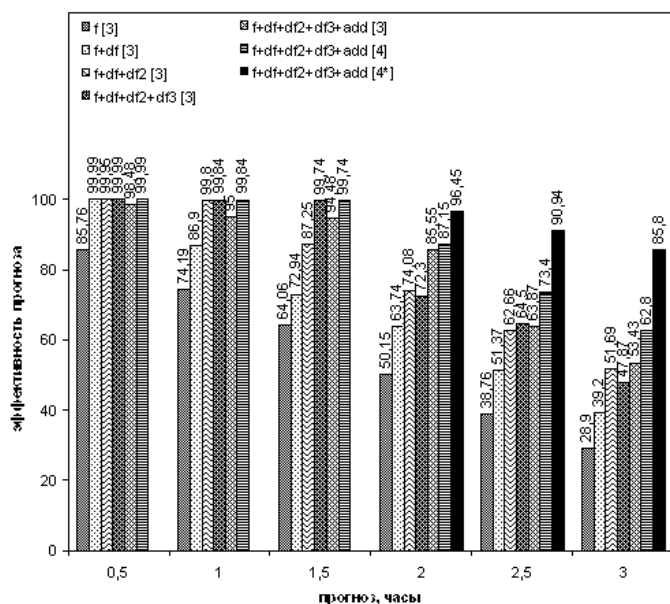
Третий параграф главы посвящен поиску оптимальной архитектуры ИНС, на основе которой в дальнейшем проводится основная часть численных экспериментов. Классическая ИНС Элмана подверглась модернизации с целью получать сети разной разветвленности (разное число нейронов и связей). Временной шаг между параметрами

межпланетной среды и частот моделируется программой подготовки единого входного пакета данных. Создан «шаблон» двухслойной сети Элмана с одним входом и одним выходом, позволяющий оперативно изменять число нейронов в скрытых слоях. В качестве примера использования ИНС с 10 нейронами в скрытых слоях на Рис. 4 приведены параллельные участки прогнозируемой и реальной последовательности критических частот за четверо суток из тестового интервала.

В четвертом параграфе продемонстрирована методика поиска дополнительных входных параметров, а так же комбинаций параметров для повышения качества прогнозирования. Рассмотрен вопрос о необходимости разделения технологии прогнозирования МНЧ для спокойных и возмущенных интервалов. Пятый параграф посвящен вопросу повышения качества восстановления профиля МНЧ при добавлении производных высокого порядка ряда МНЧ в число входных параметров при обучении и дальнейшей работе нейросети. Показано, что с помощью разветвленной ИНС можно проводить прогнозирование МНЧ с заблаговременностью 0,5-3 часов с точностью не ниже 85%. Диаграмма, представленная на Рис. 5, иллюстрирует динамику качества прогноза в каждой серии численных экспериментов для майского интервала данных. В этих экспериментах в качестве дополнительного параметра добавлялся индекс Dst, или рентгеновское излучение, или Vz компонента вектора ММП, задержанная на 3 часа относительно частоты. Эти параметры давали приблизительно одинаковый вклад в изменение качества прогноза.



**Рис. 4.** Результат прогноза на 1 час для интервала с 22 марта 00:00 по 25 марта 23:59. Входной массив – последовательность критических частот и её производная. Сплошной линией показана реальная последовательность, пунктиром – прогноз. PE=92%, R=0.96.



**Рис. 5.** Динамика эффективности прогнозирования МНЧ (Fкр) на майском интервале при последовательном добавлении производных высокого порядка и дополнительного параметра при обучении разветвленной сети с помощью механизма контрольной проверки.

Столбцы на рисунке 5 соответствуют последовательному добавлению производных (df, df2, df3) и дополнительного параметра (add) в обучающий массив. В квадратных скобках указан тип сети. Знак «\*» означает применение дополнительного алгоритма коррекции к ответному сигналу ИНС.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы проведенного исследования:

**1.** Выполнена классификация скачков параметров солнечного ветра по данным КА WIND за трехлетний период их измерений (1996-1999 гг.) используя одножидкостный МГД подход с помощью специально созданной классификационной искусственной нейронной сети вида «слой Кохонена». Для выделенных классов скачков разработан и применен способ определения ориентации плоскостей их поверхностей в солнечном ветре по одномерным наблюдениям на КА. Выполнен анализ эволюционности найденных ударных волн, который продемонстрировал их потенциальную неустойчивость.

**2.** Выделены классы структур Dst-вариаций, соответствующие магнитным бурям определенной интенсивности и конкретным типам возмущений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, которые связаны с указанными солнечными плазменными потоками:

Класс №1 – слабые бури, являющиеся следствием взаимодействия с магнитосферой Земли коротирующих с Солнцем потоков (corotating-streams).

Класс №2 – слабые бури, являющиеся следствием взаимодействия с магнитосферой Земли медленных гелиосферных потоков с низкой концентрацией плазмы.

Класс №3 – умеренные бури, являющиеся следствием взаимодействия с магнитосферой Земли коротирующих потоков, которые до этого взаимодействовали с HCS-потоком или гелиосферным токовым слоем.

Класс №4 – умеренные бури, являющиеся следствием взаимодействия с магнитосферой Земли быстрых, высокоинтенсивных corotating-потоков.

Класс №5 – умеренные бури, являющиеся следствием взаимодействия с магнитосферой Земли высокоскоростного потока, прошедшего мимо Земли и задевшего ее своим флангом.

Класс №6 – умеренные бури, являющиеся следствием взаимодействия с магнитосферой Земли сразу нескольких гелиосферных потоков.

Класс №7 – сильные бури, являющиеся следствием взаимодействия с магнитосферой Земли уединенных, не имеющих периодической повторяемости, потоков с выраженными ударными волнами.

Класс №8 – сильные бури, являющиеся следствием взаимодействия КВВ в форме магнитного облака с магнитосферой Земли.

Применение ИНС для классификации Dst-вариаций геомагнитного поля в периоды магнитосферных возмущений позволило выявить характерные особенности временной структуры этих вариаций в зависимости от типа солнечных плазменных потоков, явившимися генераторами зафиксированных возмущений: вспышки, корональные дыры, активизировавшиеся волокна (протуберанцы), корональные выбросы вещества и их сочетания.

**3.** Выполнено разделение геомагнитных станций, ведущих регистрацию геомагнитных вариаций, Гренландской меридиональной цепочки по их местоположению и принадлежности к одной из трех характерных полярных областей (полярная шапка, полярный овал, субавроральная зона) на основе классификации, выполненной с привлечением самообучающейся искусственной нейронной сети (ИНС) типа слоя Кохонена. В качестве входных параметров для выделения трех возможных классов пространственного положения отдельной станции цепочки, используются характеристики амплитудно-частотных спектров и матриц вейвлет-коэффициентов, получаемых по геомагнитным данным этих станций. Таким образом, существует возможность контролировать размеры и границы полярной шапки и аврорального овала в реальном масштабе времени на основе геомагнитных данных меридиональных цепочек станций.

4. Реализовано прогнозирование на интервал 0,5-3 часа максимально наблюдаемой и критической частоты ионосферного слоя F2 на основе метода искусственных нейронных сетей с использованием параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Выявлена связь этих частот с вариациями индекса геомагнитной активности Dst и с мощностью рентгеновского излучения Солнца. Определены характерные времена реакции ионосферы на изменения ключевых параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

### Список работ по теме диссертации

1. Бархатов Н.А., Валов В.А., Макаров А.В., Понятов А.А., **Ревунов С.Е.**, Сахаров С.Ю., Урядов В.П., Метод искусственных нейронных сетей и его применение к прогнозированию ионосферного КВ радиоканала. Труды IX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь», 22-24 апреля 2003 г., Воронеж, Том III, С.1853-1864.
2. Barkhatov N.A., Ponyatov A.A., Uryadov V.P., Barkhatova O.A., **Revunov S.E.**, Forecasting of ionospheric hf channel by the artificial neural networks method // Abstracts of IUGG XXIII General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003, GA11.03/02A/A13-005, С.А298
3. Бархатов Н.А., **Ревунов С.Е.**, Прогнозирование критической частоты ионосферного слоя F2 методом искусственных нейронных сетей. VIII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины, 20-25 апреля 2003 г., Дзержинск, Тезисы докладов, Н. Новгород, 2003, С.98-99
4. Barkhatov N.A., Levitin A.E., **Revunov S.E.** Comprehensive classification of geomagnetic disturbances. Geophysical Research Abstracts, V.6, 04796, European Geosciences Union, General Assembly 2004, ST5, Nice, France, 25-30 April 2004
5. **Ревунов С.Е.**, Дудкина И.С. Повышение эффективности прогнозирования критической частоты ионосферного слоя F2. Сборник тезисов Десятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Тезисы докладов: В 2 т. – Москва, издательство АСФ России, 2004, Т.2. С. 915
6. Barkhatov N.A., **Revunov S.E.**, Uryadov V.P. Improvement of ionospheric layer f2 critical frequency forecasting. Geophysical Research Abstracts, V.6, 04789, European Geosciences Union, General Assembly 2004, ST14, Nice, France, 25-30 April 2004
7. Бархатов Н.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.** Космическая классификация глобальных геомагнитных возмущений. Тезисы докладов III Международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», 16-21 августа 2004, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН (с. Паратунка, Камчатская обл.), С.46
8. Бархатов Н.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.** Классификация глобальных геомагнитных возмущений на основе комплекса событий космической погоды. Тезисы докладов международной конференции «Солнечно-земная физика», Иркутск, 20-25 сентября 2004 г., С.46
9. Barkhatov N.A., **Revunov S.E.**, Uryadov V.P. (2004), Forecasting of the critical frequency of the ionosphere F2 layer by the method of artificial neural networks. Int. J. Geomagn. Aeron., 5, GI2010, DOI:10.1029/2004GI000065
10. Бархатов Н.А., **Ревунов С.Е.**, Урядов В.П. Технология искусственных нейронных сетей для прогнозирования критической частоты ионосферного слоя F2. // Известия ВУЗов «Радиофизика», 2005, Т.48. С.1-15

11. Бархатов Н.А., **Ревунов С.Е.**, Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Валов В.А. Прогнозирование МНЧ с помощью искусственных нейронных сетей. Материалы 21 Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 24-27 мая 2005 г.
12. Barkhatov N., Levitin A., **Revunov S.** Location of high latitude zones of geomagnetic activity by the data from the Greenland chain of magnetic stations. // Abstracts of 10-th IAGA Scientific Assembly, Toulouse-France, July 18-29, 2005, IAGA2005-A-01244
13. Barkhatov N.A., **Revunov S.E.**, Ulibina R.I. Classification of discontinuities in parameters of space plasma using magnetohydrodynamic approach. Abstracts of 9th Asian-Pacific Regional International Astronomical Union (IAU) Meeting (APRIM\_2005), Bali, Indonesia, 26-29 July 2005, P.17
14. Barkhatov N.A., Gromova L.I., Dremuhina L.A, Levitin A.E., **Revunov S.E.**, Ulibina R.I. The analysis of magnetospheric disturbance power according to its solar source. Abstracts of 9th Asian-Pacific Regional International Astronomical Union (IAU) Meeting (APRIM\_2005), Bali, Indonesia, 26-29 July 2005, P.18
15. Бархатов Н.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.** Установление границ областей полярной шапки и овала полярных сияний по данным Гренландской цепочки магнитных станций. Тезисы Всероссийской конференции «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности» (10-15 октября 2005 г., г. Троицк), С.7
16. Бархатов Н.А., Громова Л.И., Дремухина Л.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.**, Улыбина Р.И. Анализ энергетики магнитосферного возмущения в зависимости от его солнечного источника. Тезисы Всероссийской конференции «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности» (10-15 октября 2005 г., г. Троицк), С.44
17. Бархатов Н.А., **Ревунов С.Е.**, Урядов В.П., Вертоградов Г.Г, Вертоградов В.Г. Учет проявлений солнечной активности при прогнозировании максимально наблюдаемой частоты ионосферного КВ радиоканала. Тезисы Всероссийской конференции «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности» (10-15 октября 2005 г., г. Троицк), С.59
18. Barkhatov N.A., **Revunov S.E.**, Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G. Forecasting of hf propagation with use of artificial neural networks. XXVIIIth URSI General Assembly New Delhi, India, 23 to 29 October 2005
19. Бархатов Н.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.** Классификация глобальных геомагнитных возмущений на основе комплекса событий космической погоды. В сб. «Солнечно-земная физика», вып.8, Изд. СО РАН, Новосибирск, 2005, С.129-131
20. **Ревунов С.Е.**, Улыбина Р.И. Нейросетевая классификация разрывов параметров космической плазмы, XI Нижегородская сессия молодых ученых, Математические науки, 22-25 мая 2006 г., Нижний Новгород, Тезисы докладов, 2006, С.36-37
21. Barkhatov N.A., Levitin A.E., **Revunov S.E.** Monitoring of polar cap spatial dynamics basing on data from Greenland chain of magnetic observatories. Abstracts of 29 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 27 February-3 March 2006, PGI KSC RAS, P.31
22. Barkhatov N.A., **Revunov S.E.** Classification of abrupt changes of the interplanetary medium parameters by a method of artificial neural networks. Abstracts of 29 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 27 February-3 March 2006, PGI KSC RAS, P.51
23. Бархатов Н.А., **Ревунов С.Е.**, Вертоградов Г.Г, Вертоградов В.Г, Валов В.А., Урядов В.П. Прогнозирование максимально наблюдаемой частоты ионосферного КВ-радиоканала методом искусственных нейронных сетей. // Геомагнетизм и аэронавигация, 2006, Т.46, N 1, С. 88-98
24. Barkhatov N.A., Dremukhina L.A., Gromova L.I., Levitin A.E., **Revunov S.E.**, Ulibina R.I. «Magnetosphere power budget role in the task of classification of magnetospheric activity

- sources» 36th Cospar scientific assembly, Beijing, China, 16-23 July 2006. Session D2.1/E3.1, A-00873
25. Бархатов Н.А., Громова Л.И., Дремухина Л.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.**, Улыбина Р.И. Учет энергетического бюджета магнитосферы в задаче классификации источников магнитосферной активности. Изв.РАН (сер.физ), 2006, 70, N10, С.1535-1537
  26. Barkhatov N.A., Levitin A.E., **Revunov S.E.** Complex Classification of Global Geomagnetic Disturbances. // Kosmicheskie Issledovaniya, 2006, Vol. 44, No. 6, pp. 488-499
  27. Barkhatov N.A., Levitin A.E., **Revunov S.E.** Monitoring of polar cap spatial dynamics basing on data from Greenland chain of magnetic observatories. Proceedings of 29 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 2007, PGI KSC RAS, P.75
  28. Barkhatov N.A., **Revunov S.E.** Classification of abrupt changes of the interplanetary medium parameters by a method of artificial neural networks. Proceedings of 29 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 2007, PGI KSC RAS, P.175
  29. Бархатов Н.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.** Контроль пространственной динамики полярной шапки и полярного овала по данным гренландской сети магнитных станций. // Геомагнетизм и аэрономия, 2007, Т.47, N2, С. 230-235
  30. Бархатов Н.А., Громова Л.И., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.** Анализ влияния электрического поля солнечного ветра на геомагнитную активность. Тезисы докладов 11 Пулковской международной конференции по физике Солнца: Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 2-7 июля 2007, С. 17
  31. Бархатов Н.А., Левитин А.Е., **Ревунов С.Е.**, Смирнова А.С., Снегирев С.Д., Хвиюзова Т.А. Классификация событий космической погоды. Тезисы докладов 11 Пулковской международной конференции по физике Солнца: Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 2-7 июля 2007, С. 19
  32. Barkhatova O.M., **Revunov S.E.**, Barkhatov N.A., Levitin A.E. Nonlinear connection of global and polar current systems on the main phase of a geomagnetic storm. Abstracts of 31 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 26-29 February 2008, PGI KSC RAS, P.12
  33. Barkhatov N., Levitin A., **Revunov S.** Connection of geomagnetic activity with orientation of the solar wind electric field concerning the terrestrial magnetic moment. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-00000, 2008 EGU General Assembly 2008

## **Оглавление диссертации**

### **Введение**

### **ГЛАВА 1. Отражение динамики параметров межпланетной среды в магнитосферно-ионосферной активности**

#### **§1.1 Крупномасштабные явления солнечной активности**

§1.2 Физические причины геомагнитной активности

§1.3 Современные методы исследования природы магнитосферно-ионосферной активности

§1.4 Постановка решаемых задач

## **ГЛАВА 2. Разработка комплексного подхода к изучению геомагнитных возмущений как следствия солнечно-земных связей**

§2.1 Геомагнитные возмущения как следствие крупномасштабных явлений солнечной активности

§2.2 Нейросетевой классификационный подход

§2.3 Задачи классификации геомагнитных возмущений на основе солнечно-земных связей

§2.4 Принципы отбора глобальных геомагнитных вариаций и поиск адекватного числа их классов

§2.5 Определение космических источников геомагнитных возмущений

§2.6 Классификация резких скачков в параметрах межпланетной среды

§2.7 Анализ влияния электрического поля солнечного ветра на геомагнитную активность

§2.8 Выводы

## **ГЛАВА 3. Особенности высокоширотных геомагнитных возмущений**

§3.1 Необходимость контроля пространственной динамики полярной шапки и аврорального овала

§3.2 Разработка методики классификации пространственного положения станций по результатам Фурье-анализа геомагнитных данных

§3.3 Разработка методики классификации пространственного положения станций по результатам вейвлет-анализа геомагнитных данных

§3.4 Обработка результатов классификации и оценка уровня согласованности классификационного и традиционного модельного подходов

§3.5 Поиск физических причин разделения спектральных характеристик магнитных возмущений в полярных областях

§3.6 Выводы

## **ГЛАВА 4. Исследование связи максимально наблюдаемой и критической частоты слоя F2 среднеширотной ионосферы с геоэффективными параметрами межпланетной среды**

§4.1 Корреляционное исследование связи критической частоты слоя F2 и МНЧ с ключевыми геоэффективными параметрами межпланетной среды

§4.2 Определение времени реакции критической частоты слоя F2 ионосферы и МНЧ на взаимодействие межпланетной среды с магнитосферой

§4.3 Поиск оптимальной нейросетевой архитектуры для прогноза ионосферных параметров

§4.4 Определение дополнительных входных параметров нейросети для повышения качества прогнозирования критической частоты слоя F2 и МНЧ

§4.5 Восстановление критической частоты и МНЧ на разветвленной нейросети методом добавления производных высокого порядка

§4.6 Выводы

**Заключение**

**Литература**

**Благодарности**



При получении результатов, представленных в диссертации, я опирался на знания и профессиональный опыт моего учителя и научного руководителя доктора физико-математических наук, профессора Николая Александровича Бархатова; сотрудников лаборатории геомагнитных вариаций ИЗМИРАН Анатолия Ефимовича Левитина, Людмилы Ивановны Громовой, Лидии Алексеевны Дремухиной; сотрудника ИКИ РАН Георгия Наумовича Застенкера; сотрудника НИРФИ Валерия Павловича Урядова. Большую помощь и поддержку мне оказали также сотрудники Научно-исследовательской лаборатории Физики Солнечно-Земных связей Нижегородского Государственного Педагогического Университета. Всем им выражаю свою признательность и благодарность.



© С.Е. Ревунов (Научно-исследовательская лаборатория  
Физики Солнечно-Земных связей НГПУ,  
**<http://spacelabnnov.110mb.com>**)

Крупномасштабные явления в солнечном ветре и  
магнитосферно-ионосферная активность

Подписано к печати « 29 » октября 2008 г.

Усл. печ. л. 1,5. Заказ 127

Тираж 100 экз.

Отдел полиграфии АНО «МУК НГПУ».  
603950, Нижний Новгород, ГСП-37, ул. Ульянова, 1