

УДК 550.374:550.385.4:550.388.2

Н.А.БАРХАТОВ, докт. физ.-мат. наук, проф., рук. лаб. физики солнечно-земных связей НГПУ им. К.Минина, e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ МАГНИТОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ПОИСКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

N.A.Barkhatov

DEVELOPMENT OF METHODS FOR PREDICTION OF MAGNETOSPHERE GEOMAGNETIC STATE ON THE BASIS OF A SEARCH OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONSHIP FUNDAMENTAL LAWS

Представлены основные результаты выполненных в недавнее время исследований лаборатории физики солнечно-земных связей, полученные при разработке методов прогнозирования магнитосферно-ионосферного состояния на основе поиска фундаментальных закономерностей влияния солнечной активности. Полученные результаты полезны при решении проблем обеспечения надежной работы технических средств коммуникаций.

Ключевые слова: солнечно-земная физика, солнечная активность, магнитные облака, геомагнитная буря, моделирование, прогноз, магнитогравитационные волны, геоиндукционные токи, коммуникация

The main results of solar-terrestrial relationships physics laboratory obtained in the development of methods for predicting the state of the magnetosphere-ionosphere on the basis of fundamental research of the influence of Solar activity in recent times presents. Results are useful in solving the problems of ensuring reliable operation of the technical means of communication.

Key words: solar-terrestrial physics, solar activity, magnetic clouds, geomagnetic storm, modeling, forecasting, magnetogravitational waves, geomagnetically induced currents, communication

1. Введение

В настоящее время лабораторией физики солнечно-земных связей (с 2004 г.) выполняются исследования солнечно-земных связей по направлениям: «Природа магнитосферно-ионосферных возмущений в периоды высокоэнергичных геофизических событий» и «Мониторинг и прогноз негативных последствий гелиогеофизической активности» в рамках научного гранта Российского фонда фундаментальных исследований «Природа сезонной вариации геомагнитной активности» и научно-образовательного проекта в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ на выполнение научных исследований «Разработка современных методов прогнозирования магнитосферно-ионосферного состояния в целях обеспечения успешных коммуникаций на основе поиска фундаментальных закономерностей влияния солнечной активности».

В представленной работе излагаются некоторые результаты, полученные коллективом лаборатории за время выполнения указанных проектов (2011-2013 гг.). Научные направления лаборатории следующие: геомагнитная эффективность солнечных выбросов (группа под рук. канд.физ.-мат.наук Ревуновой Е.А.); пространственно-временная динамика магнитогидродинамических возмущений в околоземном пространстве в периоды геомагнитных бурь (группа под рук. канд.физ.-мат.наук Ревунова С.Е.); плазменная и электромагнитная магнитосферно-ионосферная возмущенность в различных солнечно-

геофизических условиях и во время высокоэнергичных геофизических событий (группа под рук. канд. физ.-мат. наук Бархатовой О.М.)

Изучение системы солнечно-земных связей является современным направлением фундаментальной и прикладной науки. Оно выполняется в рамках междисциплинарной области на границе космической физики и геофизики, которая называется солнечно-земной физикой (СЗФ) [1]. Рассматриваемые здесь практические проблемы влияния космической среды связаны также с исследованиями по радиофизике, физике твердого тела, биологии и медицине. СЗФ изучает зависимости между гелиофизическими и геофизическими процессами. При этом традиционно из рассмотрения исключается действие постоянного потока теплового солнечного излучения, и внимание концентрируется на переменных составляющих солнечного влияния: коротковолновом солнечном электромагнитном излучении, солнечном ветре, солнечных космических лучах. При этом динамика плазмы в Солнечной системе исследуется с точки зрения передачи к Земле энергии, выделяющейся в нестационарных процессах на Солнце, и ее перераспределения в магнитосфере и ионосфере. Совокупность явлений в цепочке солнечно-земных связей в виде факторов космической погоды представлена на диаграмме (рисунок 1).

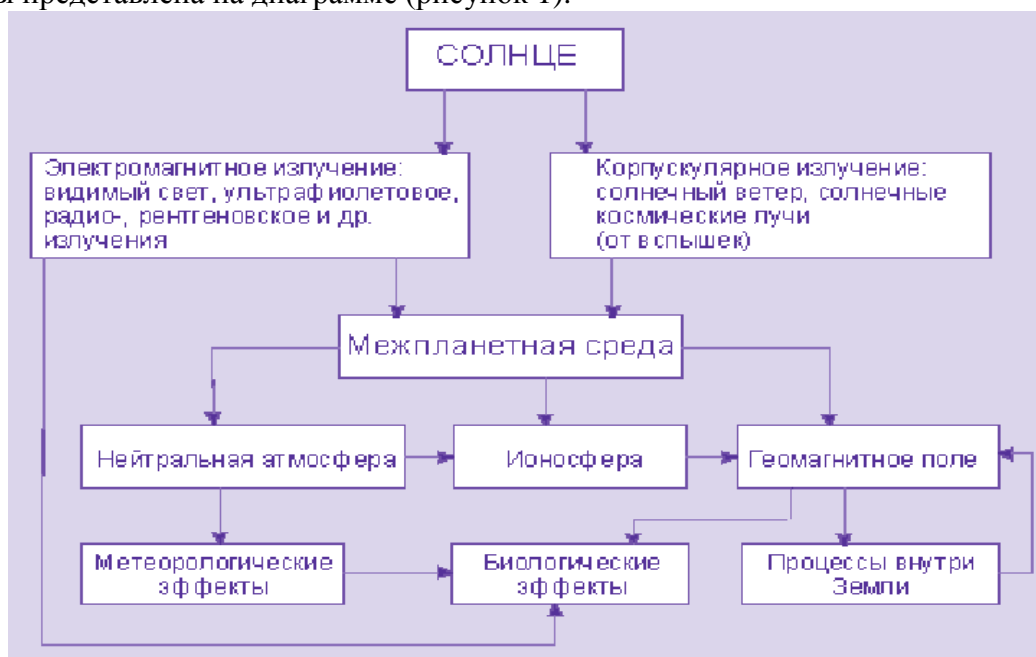


Рисунок 1 – Последовательность событий, обеспечивающая солнечно-земные связи

По мере развития технологий выяснилось влияние солнечной переменности на технические системы: радиосвязь, трубопроводы и линии электропередач, электронную аппаратуру самолетов и спутников, а также на климат, человека и другие биологические объекты. В этой связи активно развиваются методы прогноза солнечной активности и магнитных бурь. Такие практически важные аспекты СЗС объединяются понятием космическая погода. Этим термином также обозначают весь комплекс переменных внешних космических факторов, оказывающих влияние на Землю. Долгопериодические (10–100 и более лет) тенденции космической погоды в последнее время называют изменением космического климата.

2. Установление типов солнечных потоков, отвечающих за генерацию геомагнитных бурь различной интенсивности

Исследования фундаментальных связей состояния геомагнитного поля с параметрами околоземной среды выполняются на материале данных гелиофизических параметров,

оказывающих наибольшее влияние на уровень геомагнитной возмущенности на средних, субавроральных и авроральных широтах. Подобные данные содержатся в многочисленных базах, размещаемых на сайтах по результатам спутниковых и астрофизических наблюдений. В некоторых случаях данные можно получать через интернет в режиме реального времени, что позволяет использовать их непосредственно при работе создаваемых прогностических инструментов. Вместе с тем для выполнения оригинальных разработок нами сформированы отдельные базы данных, ориентированные на решение конкретных поставленных задач.

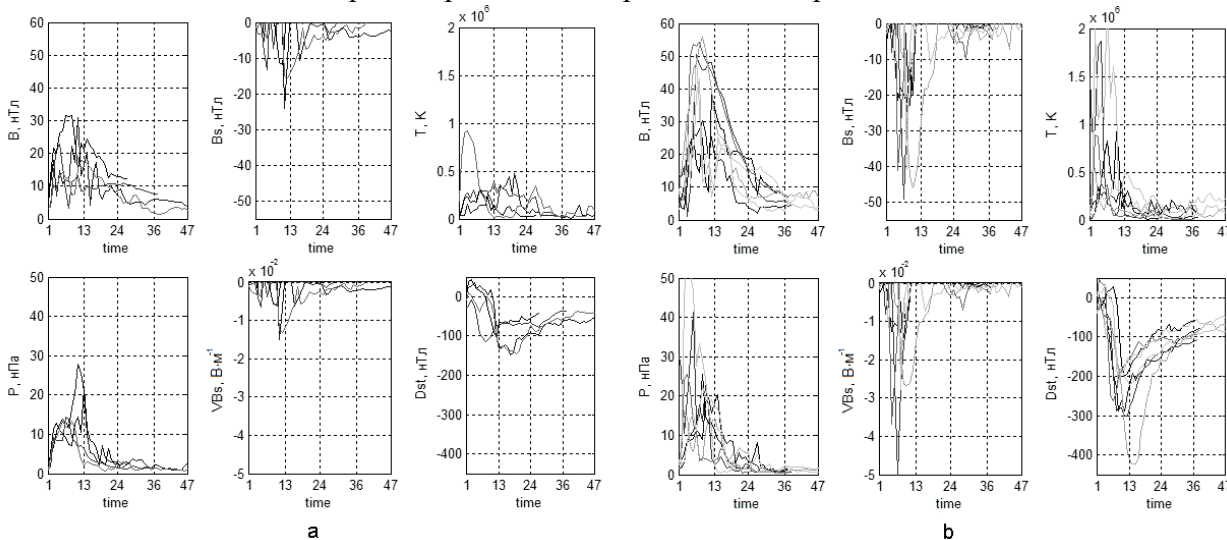


Рисунок 2 – Динамика среднего значения полного магнитного поля и южной компоненты его вектора, температуры, динамического давления и электрического поля солнечного ветра и Dst-индекса для комплексов сильных классических бурь (а) и комплекса экстремальных бурь (б)

В рамках исследований 2012 года по диагностике типа подошедшего к магнитосфере возмущенного потока и прогноза интенсивности ожидаемой геомагнитной бури нами выполнен анализ геоэффективности основных типов солнечных потоков. Были рассмотрены: магнитные облака и их комбинации с ударными волнами и оболочками, корональные выбросы вещества (КВВ), области сжатия перед высокоскоростными потоками от корональных дыр (CIR) и их комбинации с высокоскоростными потоками от корональных дыр (CIR+HSS), волоконные потоки и потоки от корональных стримеров. Сопоставлением типа солнечного источника и соответствующей ему геомагнитной бури установлено, что наиболее геоэффективными структурами являются магнитные облака и КВВ. Также высокий вклад в геомагнитную обстановку вносят CIR. Геомагнитные бури не развиваются при взаимодействии магнитосферы Земли с волоконными потоками и потоками от корональных стримеров [2]. На рисунке 2 представлены примеры динамики ММП (среднего значения полного магнитного поля и южной компоненты его вектора), ПСВ (температуры, динамического давления и электрического поля солнечного ветра) и Dst-индекса для комплексов сильных классических бурь (а) и экстремальных бурь (б).

3. Количественная связь интенсивности геомагнитной бури с динамикой магнитного поля плазменного облака солнечного ветра

Наиболее сильные геомагнитные возмущения относятся к случайной составляющей геомагнитной активности. Для того чтобы они произошли, кроме появления выброса вещества в конкретной области Солнца, необходимо попадание этого выброса по земной магнитосфере; наличие в выбросе отрицательной вертикальной ($B_z < 0$) компоненты вектора ММП; прохождение Земли именно через участок выброса, где такое поле содержится. В

этом случае становится понятным, что длительность фаз магнитных бурь и их амплитудные характеристики зависят от траектории прохождения плазменного выброса через Землю. Нами показана способность конкретного магнитного облака солнечного ветра вызывать магнитные бури разной продолжительности и интенсивности или вообще не генерировать бурю, в зависимости от траектории его прохождения через магнитосферу Земли. В основе этого исследования лежит пространственное распределение магнитного поля, задаваемое реалистичной моделью облака. Полученные результаты позволяют оценить зависимость интенсивности магнитной бури от траектории прохождения магнитосферы Земли через магнитное облако [3].

Соответствие параметров реальных магнитных облаков характеристикам возникающих геомагнитных бурь было изучено анализом магнитных облаков, обнаруженных по данным спутниковой системы OMNI за интервал времени с 1980 по 2007 гг. Поиск магнитных облаков в потоке спутниковых данных и моделирование их структуры (определение их параметров) проводилось с помощью специально созданной программы поиска облаков в данных космических аппаратов. Установление соответствия параметров реальных магнитных облаков характеристикам возникающих геомагнитных бурь проводилось путем сопоставления параметров магнитных облаков с интенсивностью вызванных ими геомагнитных бурь (по геомагнитным индексам). Изучение общей геоэффективности рассматриваемых магнитных облаков установило: 79% облаков вызвали геомагнитные бури, при этом 29% магнитных облаков стали источниками интенсивных магнитных бурь (сильных и экстремальных), 23% – умеренные бури, а 27% – слабые бури. Сопоставление основных параметров облаков с интенсивностью вызванных магнитных бурь показало: наибольший вклад в геоэффективность облака дает угол наклона оси облака к плоскости эклиптики (ϵ). Кроме того, на интенсивность геомагнитной бури влияние оказывает значение магнитного поля на оси облака (B_0) и угол β .

Изучение зависимости интенсивности генерируемых геомагнитных бурь по индексам Dst, Kp, Ap и aa от параметров магнитных облаков (полярный ϵ и азимутальный β углы ориентации оси облака, значение магнитного поля на оси, расстояние от оси облака до линии Солнце-Земля – прицельный параметр) показало следующее.

1. В периоды равноденствия более геоэффективными являются облака с небольшими значениями угла наклона ϵ оси облака к плоскости эклиптики (т.е. лежащие облака). Возможно, это связано с их «многочисленностью» в околоземном пространстве. Остальные события дают примерно равнозначный вклад в интенсивность геомагнитных бурь.
2. В периоды солнцестояния в геомагнитную активность вклад магнитных облаков с большими значениями угла ϵ увеличивается. Появляется заметный разброс в значениях интенсивности магнитных бурь, вызванных магнитными облаками с ϵ от 60 до 90°. В периоды солнцестояния такие облака вызывают более интенсивные бури, чем в период равноденствия, а облака с небольшими углами ϵ в период солнцестояния являются менее геоэффективными, что особенно проявляется в динамике индексов Dst и Ap.
3. Геомагнитные бури чаще вызываются магнитными облаками со значениями угла β от 30 до 60°. В периоды равноденствия общая геоэффективность облаков любой ориентации несколько выше, чем в периоды солнцестояния. В основном магнитные облака имеют значение магнитного поля на оси в диапазонах от -30 до -10 нТл и от 10 до 30 нТл. При увеличении значений магнитного поля на оси облаков нелинейно увеличивается и интенсивность генерируемых ими магнитных бурь.
4. Зависимость интенсивности геомагнитных бурь от величины прицельного параметра недостаточно заметна. Это понятно, поскольку в окрестности Земли наиболее часто регистрируются облака с малыми значениями прицельного параметра, т.е. выбросы, идущие вдоль линии Солнце-Земля, облака с большими значениями прицельного параметра, как правило, проходят мимо Земли.

4. Комплексы космической погоды, включающие характеристики солнечного потока и параметры его геомагнитного проявления

Выполнена классификация комплексов космической погоды, включающих в себя характеристики возмущающего солнечного потока (параметры солнечного ветра и компоненты межпланетного магнитного поля) и параметры его геомагнитного проявления в виде динамики Dst-индекса. Для этого были разработаны сопоставительный и нейросетевой методы классификации. Сопоставительный метод реализуется путем сопоставления данных каталогов, литературы, динамики параметров межпланетной среды и их геомагнитных проявлений различной интенсивности и формы. Сопоставление полученных результатов продемонстрировало недостатки сопоставительного метода, связанные с использованием неоднозначных результатов, изложенных в литературных источниках. В процессе численных нейросетевых экспериментов установлены типы солнечных потоков, отвечающие за генерацию геомагнитных возмущений различной интенсивности. Нейросетевая классификация дает однозначные результаты, которые в 84% рассмотренных случаев совпадают с результатами сопоставительной классификации. Всего было выделено восемь классов комплексов космической погоды:

Класс 1 – геомагнитные возмущения с поднятием Dst-индекса, источником которых являются потоки от корональных стримеров или волоконные потоки.

Класс 2 – геомагнитные возмущения с поднятием Dst-индекса и незначительным последующим провалом, вызываемые комбинацией CIR и высокоскоростного потока (HSS) от корональных дыр.

Класс 3 – слабые магнитные бури, источниками которых являются CIR, или комбинации CIR–HSS.

Класс 4 – умеренные классические бури, вызываемые MC или ICME с ударной волной.

Класс 5 – умеренные неклассические бури, источниками которых являются CIR или комбинации CIR–HSS.

Класс 6 – сильные классические бури, вызываемые ICME с ударными волнами или комбинациями оболочек и ведущего поля MC.

Класс 7 – сильные неклассические бури, вызываемые CIR.

Класс 8 – экстремальные классические бури, вызываемые комбинациями ударных волн, оболочек и ведущего поля MC.

Результаты классификации свидетельствуют о том, что основными источниками глобальных геомагнитных бурь являются CIR и различные комбинации ударных волн, оболочек и ведущего поля ICME/MC. Потоки от корональных стримеров и волокон в основном вызывают только поднятие Dst-индекса. Наиболее сильные (экстремальные) по интенсивности глобальные геомагнитные бури генерируются комбинациями ударных волн, оболочки и ведущего поля магнитных облаков.

С точки зрения исследования солнечных процессов потоки солнечного ветра и вызванные ими геомагнитные возмущения являются диагностическими инструментами солнечных процессов. Именно это причинно-следственное обстоятельство является основой разработанного классификационного метода. Так, например, в корональной дыре, представляющей собой область с сильно разреженной, холодной и высокоскоростной плазмой, образуется поток с высокой скоростью течения, низкой плотностью и температурой. Однако его геомагнитная эффективность целиком определяется величиной и направлением магнитного поля в солнечном источнике (классы 3, 5 и 7). В случае плотного потока солнечного ветра (стримеры и волокна), имеющего высокое значение давления, но не содержащего $V_z < 0$, как правило, результатом воздействия на магнитосферу является только поднятие Dst-индекса (классы 1-3). Потоки, в которых наблюдаются несколько скачков плотности (комбинация CIR и HSS), приводят к развитию неклассических многошаговых магнитных бурь (классы 5 и 7). Наличие в таком потоке южной компоненты ММП делает его

потенциально геоэффективным. Таким образом, интенсивность случившейся магнитной бури является признаком сложных магнитных полей в солнечных источниках.

5. Краткосрочный прогноз интенсивности геомагнитных бурь по начальным измерениям межпланетного магнитного поля в облаке, воздействующем на магнитосферу

Разработан метод краткосрочного прогнозирования интенсивности геомагнитных бурь, ожидаемых при воздействии магнитных облаков на магнитосферу Земли. Прогноз основан на использовании методики определения параметров облака по начальным спутниковым измерениям в нем компонент вектора межпланетного магнитного поля в рамках предложенного нами моделирования магнитного облака в окрестности Земли и установленной связи между Dst-индексом и средним из трех минимальных значений Vz компоненты вектора ММП для рассматриваемых случаев [2]. Тестирование разработанного метода прогнозирования интенсивности магнитных бурь проведено на реальных магнитных облаках, зарегистрированных на КА ACE. Отклонения прогнозируемой интенсивности геомагнитных бурь для 83% рассмотренных магнитных облаков не превышают 30% от интенсивности реальных геомагнитных бурь. Более высокие значения отклонений прогнозируемой интенсивности бурь от интенсивности геомагнитных бурь, вызванных реальными облаками, отмечаются для магнитных облаков, имеющих высокогеоэффективную оболочку и содержащих резкие непродолжительные скачки в Vz компоненте вектора ММП.

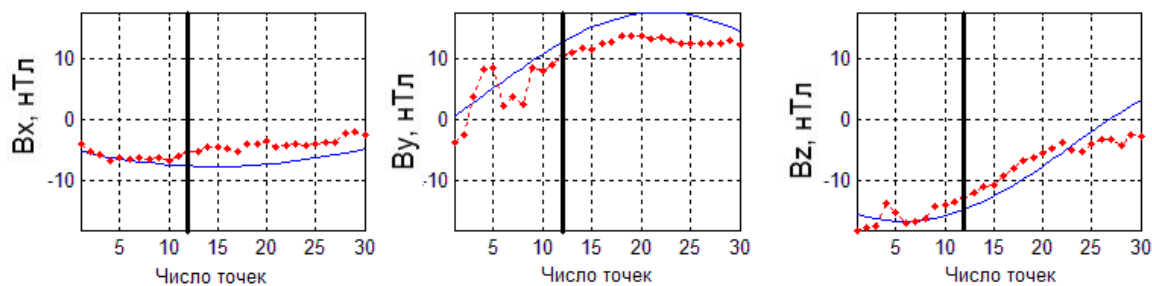


Рисунок 3 – Сопоставление реальных данных (сплошные линии) и результатов моделирования (линии звездочек) компонент магнитного поля в облаке обнаруженного 28-30.10.2000

На рисунке 3 представлено сопоставление экспериментальных данных измерений и результатов нашего моделирования компонент магнитного поля в облаке обнаруженного 28-30.10.2000. Установленные нами параметры модельного облака позволили получить значение интенсивности ожидаемой бури. Полученное по 39% данных от всего события облако содержит в своем объеме $V_z < -15$ нТл в течение 5 часов подряд, следовательно, оно должно было вызвать сильную бурю, $Dst = -129$ нТл. Реальная интенсивность геомагнитной бури, вызванной облаком, оказалась почти такой же ($Dst = -127$ нТл).

6. Диагностика типа подошедшего к магнитосфере возмущенного потока на основе спектров магнитных возмущений, зарегистрированных вдоль геомагнитного меридиана

Обнаружена распределенная по широте реакция магнитосферы в низкочастотных возмущениях геомагнитного поля в диапазоне магнитогидродинамических (МГД) волн на возмущенные параметры солнечного потока. Полученные временные задержки позволяют уточнить тип геоэффективного солнечного плазменного потока, с которым связано возникновение геомагнитной бури. Выполнение этого исследования потребовало разработать специальный алгоритм количественной оценки согласованности локальных

максимумов составляющих вейвлет спектра (скелетонов) возмущений геомагнитного поля, зарегистрированных вдоль меридиональной цепи станций и возмущений параметров солнечного плазменного потока в интервалы геомагнитных бурь [4].

Вывод о согласованности любой пары скелетонов делается на основе вычисления среднеквадратичного отклонения моментов регистрации локальных максимумов спектра.

Для этого определяются координаты точек по оси абсцисс (время) $X = [x_1 x_2 \dots x_n]$ и оси ординат (частота) $Y = [y_1 y_2 \dots y_n]$, образующих скелетон в своем фрейме. Для каждой пары скелетонов вычисляется среднеквадратичное отклонение по формуле:

$$Dx = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{s1} - x_i^{s2})^2}$$

где n – число точек, образующих скелетон (в наших экспериментах n = 23), s1, s2 – индексы принадлежности к скелетону в выбранной паре. Затем нормируем отклонение по общему максимальному значению выборки и получаем значение в процентах:

$$Dxn_i = \left(1 - \frac{Dx_i}{\max(Dx)} \right) \cdot 100\%$$

На рисунке 4 демонстрируется пример расчета Dxn.

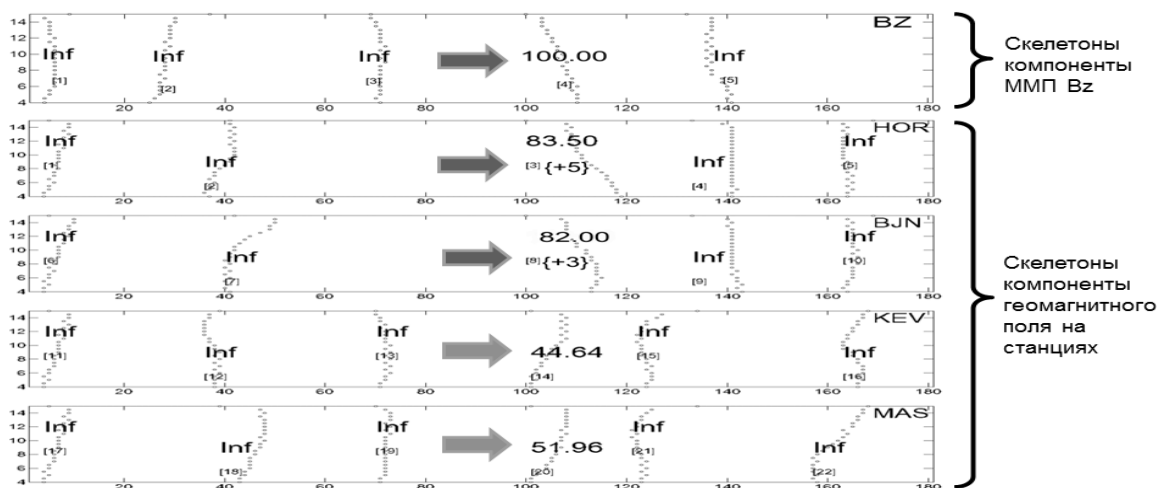


Рисунок –. Пример расчета величины Dxn для пар скелетонов. В фигурных скобках указано время сдвига. Скелетоны, не вошедшие в выборку, отмечены символом «Inf». По оси абсцисс отложено время в минутах, по оси ординат – масштабные вейвлет-коэффициенты

Выполненное исследование позволило обнаружить следующие закономерности.

1. Предбуревая реакция магнитосферы в возмущениях геомагнитного поля на возмущенные параметры солнечного потока заключается в ее быстром ответе в высоких широтах и запаздывающем в субавроральной зоне. Область полярной шапки и аврорального овала подвержены прямому воздействию возмущенности переднего края солнечного потока, в то время как субавроральные области возмущаются возникающим при этом внутримангнитосферным источником, вызванным действием потока солнечного ветра.
2. Время реакции магнитосферы в возмущениях геомагнитного поля на начальной фазе бури на всех рассматриваемых широтах одинаково мало. Это возможно, если все станции получения анализируемых данных во время этой фазы попадают в область полярной шапки и регистрируют колебания в потоке солнечного ветра.

3. На главной фазе бури под действием потоков типа областей взаимодействия быстрого солнечного ветра с медленным, реакция магнитосферы в возмущениях геомагнитного поля на возмущенные параметры солнечного потока характеризуется быстрым ответом в высоких широтах и запаздывающим в субавроральной зоне. Под действием потоков типа магнитное облако с турбулентной оболочкой и/или с ударной волной время реакции на всех рассматриваемых широтах одинаково мало. Различие вызвано разной геометрией искривления силовых линий магнитосферы под действием разных потоков.

7. Магнитогравитационная активность, вызванная гелиогеофизической активностью

Одним из наиболее заметных проявлений волновых движений в ионосфере являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). В качестве основных источников ПИВ обычно рассматривают акустикогравитационные волны (АГВ), которые могут быть связаны с движением терминатора, струйными течениями, возбуждаться во время землетрясений или возникать в периоды интенсификации авроральных электроджетов. Однако в ионосфере как проводящей среде кроме АГВ могут распространяться магнитогравитационные волны (МГВ), скорость которых оказывается выше скорости АГВ, но ниже, чем скорость магнитогидродинамических (МГД) волн. Экспериментальное подтверждение существования МГВ в ионосфере на высотах слоя F2 впервые получено во время высотных ядерных взрывов.

Наши исследования явления МГВ показали возможность их обнаружения и во время естественных высокоэнергичных геофизических событий. В рамках этой работы нами были разработаны основы методики классификации ионосферной возмущенности, вызванной гелиогеофизической активностью, по данным о критической частоте слоя F2. При этом продемонстрирована достаточная информативность разработанного индекса ионосферной активности для характеристики ионосферной активности любого сезона [5]. Ответственность МГВ за часть перемещающихся ионосферных возмущений и возможность их использования для мониторинга окружающей среды подтверждена аналитическим анализом полученных дисперсионных соотношений и дисперсионных кривых для МГВ в ионосфере при учете совместного влияния магнитного поля и силы тяжести в уравнениях гидродинамики в условиях конечной проводимости.

На рисунке 5 (а, б) приведены расчетные фазовые и групповые скорости быстрой «+» моды и медленной «-» моды МГВ в рассматриваемом диапазоне длин волн. Безразмерные значения фазовой скорости для «+» моды составляет около 8, для «-» моды – около 5,5. Безразмерные значения групповой скорости «+» моды составляют около 5,5, для «-» моды около 6 для продольного распространения и около 4,5 для распространения под углом $\theta = 45^\circ$. Реальные значения скоростей могут быть получены при умножении безразмерных значений на скорость звука ($\sim 500 - 600$ м/с). Таким образом, скорости мод лежат в интервале 3000 - 4000 м/с.

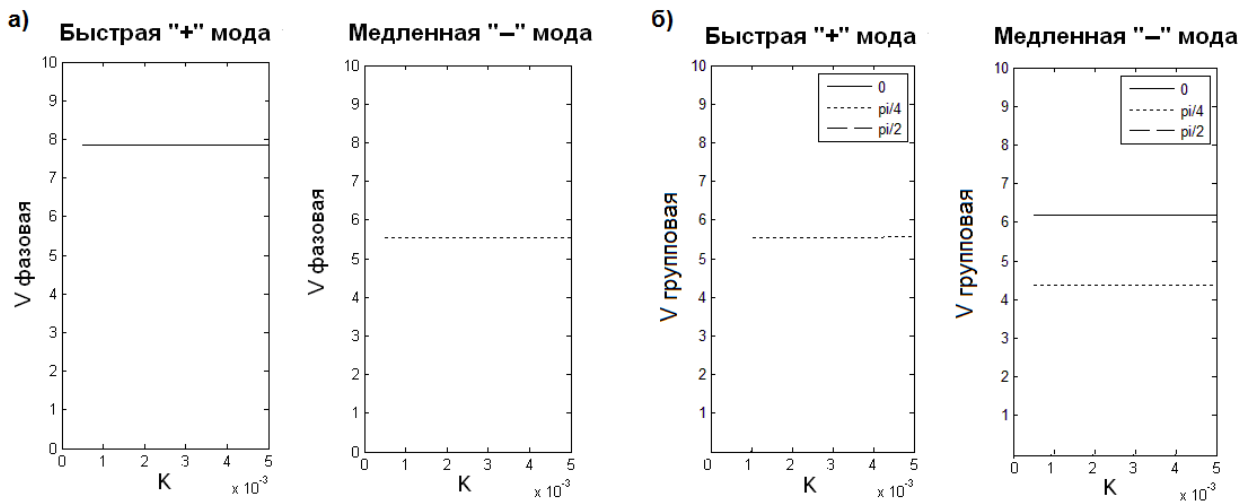


Рисунок 5 – Фазовые скорости быстрой «+» моды и медленной «-» моды МГВ: сплошная линия соответствует продольному распространению ($\theta = 0^\circ$), мелкий пунктир – распространению под углом ($\theta = 45^\circ$) МГВ

В результате установлено, что особенности экспериментальных динамических спектров МГВ согласуются с характерными частотами и скоростями, полученными по расчетным дисперсионным кривым [6].

8. Оценка индукционных токов в коммуникациях

Обращено внимание на важный аспект влияния космической погоды на технические средства разного рода коммуникаций связанный с возникновением геоиндуцированных токов (ГИТ) в протяженных проводящих объектах (нефте- и газопроводы, линии электропередачи и т.п.). Выполнен обзор работ, в которых рассчитываются величины токов, индуцируемых в протяженных проводящих коммуникациях. Проведены оценки индукционных токов генерируемых геомагнитными пульсациями диапазона Pc-4 (вариации геомагнитного поля) в длинной коммуникации (кабель, трубопровод). Расчет выполнен для свободного пространства и для проводящего грунта. Рассчитаны импедансы грунта для данного частотного диапазона и значения напряжений, наводимых индукционными токами. Проведено сопоставление полученных результатов и сделан вывод о применимости рассматриваемых физических моделей. Получена зависимость величин индукционных токов в коммуникациях от частот и амплитуд вариаций геомагнитного поля [7]. Для примера на рисунке 6 приведены результаты расчетов ГИТ в бесконечно длинном стальном трубопроводе.

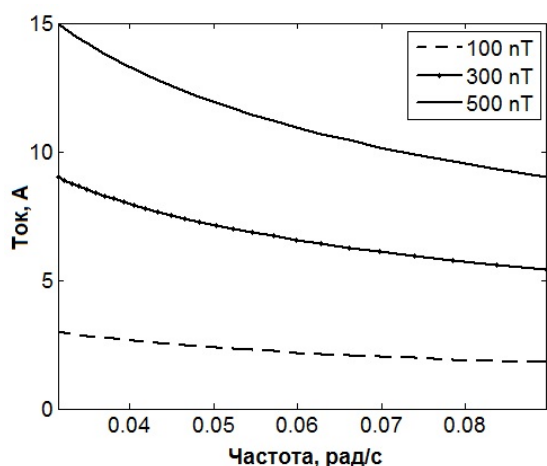


Рисунок 6 – Индукционный ток в бесконечно длинном стальном трубопроводе в зависимости от частоты пульсаций, вычисленный для различных амплитуд геомагнитных пульсаций $P_c 4$.

Пунктирная линия соответствует амплитуде 100 нТл, линия с маркерами – амплитуде 300 нТл, сплошная линия – амплитуде 500 нТл

9. Заключение

Полученные результаты можно использовать: для оценки ожидаемых высокоэнергичных внутримангитосферных волновых и плазменных проявлений выбросов солнечной плазмы, обнаруженных с помощью наблюдений на патрульных космических аппаратах; для оценки индексов геомагнитной активности, характеризующих конкретную геомагнитную бурю; выделенные комплексы космической погоды позволяют более подробно изучать воздействие на магнитосферу Земли различных потоков солнечной плазмы и способствуют разработке методов прогнозирования глобальной геомагнитной обстановки; метод расчета распределения магнитного поля в подходящем к Земле облаке полезен для краткосрочной оценки интенсивности ожидаемой геомагнитной бури; как диагностический инструмент для уточнения типа плазменного потока солнечного ветра по уникальным спектральным признакам возмущений скорости, плотности, величине магнитного поля.

Разработанные и упомянутые выше методы готовы для оценки уровня возмущенности геомагнитного поля обусловленной гелиогеофизическими связями. Информация о состоянии геомагнитного поля, получаемая в реальном масштабе времени, может быть использована для предупреждения организаций, эксплуатирующих объекты коммуникаций о возможных сбоях их рабочего состояния

В образовательной сфере результаты научных исследований используются и будут использованы при подготовке магистерских и кандидатских диссертаций, а также для модернизации читаемых учебных курсов ВПО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бархатов, Н.А. Солнечно-земные связи: задачи на современном этапе / Н.А.Бархатов, О.М.Бархатова, С.Е.Ревунов, Е.А.Ревунова, А.В.Королев, Р.В.Романов, Р.И.Серебрякова, Д.В.Шадруков, Н.В.Косолапова, А.Б.Виноградов // Труды (Шестнадцатой) Научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.Н. Бархатова. ННГУ, 11-18 мая 2012 г. – Н.Новгород: Изд. «Нижегородский университет», 2012. – С. 18-29.
2. Бархатов, Н.А. Краткосрочный прогноз интенсивности геомагнитных бурь, ожидаемых при воздействии магнитных облаков на магнитосферу Земли / Н.А.Бархатов, Е.А.Ревунова, А.Е.Левитин // Солнечно-земная физика. Изд. СО РАН. – 2011. – Вып. 19. – С. 40-45.

3. Barkhatov N.A., Revunova E.A., Levitin A.E. Geomagnetic efficiency of Solar ejection depended on relative orientation of Sun and Earth rotation axes. Proc. XXXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". Apatity, 2012. P. 85-88.
4. Бархатов, Н.А. Уточнение типов солнечных плазменных потоков по анализу вне и внутримангнитосферных низкочастотных колебаний в периоды магнитных бурь / Н.А.Бархатов, С.Е.Ревунов, Д.В.Шадруков // Приволжский научный журнал. – 2013. – №1. – С. 106-112.
5. Бархатов, Н.А. Выявление классов ионосферной возмущенности по многолетним данным о критической частоте слоя F2 / Н.А.Бархатов, О.М.Бархатова // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 510-518.
6. Бархатов, Н.А. Магнитогравитационные волны в ионосфере в условиях конечной проводимости / Н.А.Бархатов, О.М.Бархатова, Г.И.Григорьев // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55, № 6. – С. 421-430.
7. Бархатова, О.М. Индукционные токи в протяженных коммуникациях, возникающие в периоды геомагнитной возмущенности / О.М.Бархатова // Приволжский научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 116-121.

© Бархатов Н.А., 2013