Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АРКТИКЕ

Вторая Всероссийская конференция
24-26 сентября 2018, г. Мурманск

Сборник трудов конференции



Апатиты
2018

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АРКТИКЕ

Вторая Всероссийская конференция
24-26 сентября 2018, г. Мурманск

Сборник трудов конференции

Апатиты
2018

УДК 551.510.535/.537

ISBN 978-5-91137-381-8

Организаторы конференции:

ФГБНУ Полярный геофизический институт
Совет по космосу РАН

Организационный комитет:

Сафаргалеев В.В. (председатель)
Орлов К.Г. (зам. председателя)
Сахаров Я.А.
Григорьев В.Ф.
Миличенко А.Н.
Сидоренко А.Е.
Привалов А.В.

Программный комитет:

д.ф.-м.н. Козелов Б.В., председатель (ПГИ)
член-корр.АН Петрукович А.А., сопредседатель (ИКИ РАН)
д.ф.-м.н. Терещенко Е.Д. (ПГИ)
д.ф.-м.н Сафаргалеев В.В. (ПГИ)
д.ф.-м.н Мингалев В.С. (ПГИ)
д.ф.-м.н.Воробьев В.Г. (ПГИ)
д.ф.-м.н. Медведев А.В. (ИСЗФ СО РАН)
д.ф.-м.н Кузнецов В.Д. (ИЗМИРАН)
д.ф.-м.н. Стародубцев С.А. (ИКФИА РАН)
д.ф.-м.н. Пилипенко В.А. (ИФЗ РАН)
д.т.н. Кулешов Ю.В. (ВКА им. Можайского)
д.т.н. Аксенов О.Ю. (ЦНИИ ВВКО)
к.т.н. Ляхов А.Н. (ИДГ РАН)
к.т.н. Мерзлый А.Н. (ИКИ РАН)
к.т.н.Тихонов В.В. (ЗАО РТИС ВКО)

Адрес

ул. Халтурина д. 15
Мурманск, 183010
РФ

Главный редактор:

В.В. Сафаргалеев

Редакторы:

Н.Н. Сафаргалеева
Н.В. Семенова

Научное издание

Подписано к печати 04.09.2018.
Формат бумаги 70×108 1/8.
Усл. печ. л. 14.06. Заказ № 356. Тираж 50 экз.

ООО «Сидосе»
197110, Санкт-Петербург, Песочная наб., 40, офис 7

Отпечатано в типографии Грейт-принт
Санкт-Петербург, набережная Обводного канала,
134/136, корп.231

http://pgia.ru/gelio_in_arctic/

Печатается по решению Ученого совета Полярного геофизического института

© Полярный геофизический институт, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина	Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака	11
Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина	Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля	15
О.М. Бархатова, Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов	Внемагнитосферный агент синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в интервалы суббуревых процессов	19
В.В. Богомолов, А.В. Богомолов, Г.К. Гарипов, А.Ф. Июдин, И.А. Максимов, А.В.Минаев М.И. Панасюк, В.Л. Петров, С.И. Свертилов, И.В. Яшин	Кратковременные возрастания потоков гамма-излучения из высокоширотной атмосферы по данным наблюдений на спутнике «Ломоносов»	23
В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.Н.Кузнецов, В.А.Шаповалов	Эффекты воздействия геоиндуцированных квазипостоянных токов на электрические сети	27
Г.К. Гарипов, М.И. Панасюк, С.И. Свертилов, В.В.Богомолов, В.О.Баринова, К.Ю. Салеев	Особенности глобального ультрафиолетового и инфракрасного техногенного свечения дневной и ночной атмосферы в полярных областях по данным наблюдений на спутнике «Вернов»	31
И.В. Дэспирак, А.А.Любчич, Н.Г. Клейменова	Появление суперсуббурь и суббурь на высоких широтах в зависимости от типов солнечного ветра	35
И.В. Дэспирак,Т.В. Козелова, Б.В. Козелов, А.А. Любчич	Суббуревая активность 24 декабря 2014 по данным спутников themis и камерам main в Апатитах	39
А.Н.Зайцев, К.Х.Кануниди, В.Г.Петров	Перспективы развития геофизического полигона на Ямале	43
А.С. Кириллов	Полосы второй положительной системы молекулярного азота в полярной ионосфере и на высотах свечения спрайтов	47
Б.В.Козелов, Я.А.Сахаров, Ю.В.Федоренко, Р.Ю.Юрик, В.Ф.Григорьев	Кольская арктическая геофизическая инфраструктурная сеть ПГИ: возможности для взаимодействия	51
Б.В.Козелов, Е.И.Скиотис,	Международные образовательные проекты как	55

Ю.В.Балабин, А.А. Чернышов, W.J. Miloch	инструмент создания сети научного сотрудничества в арктическом регионе	
О.М. Лебедь, Ю.В.Федоренко, Ю. Маннинен, Н.Г. Клейменова, А.С.Никитенко	Моделирование прохождения аврорального хисса к земной поверхности	59
В.А. Любчич, А.Е. Сидоренко, И.И. Демченко	Применение индукционных магнитометров в радиоголографическом методе поисков локальных рудных объектов	63
А.А. Намгаладзе, С.А.Парфенов, М.А. Князева О.В. Золотов	Моделирование ионосферы и термосферы для марта 2013 года в полуэмпирическом и полностью самосогласованном вариантах глобальной модели UAM	67
А.С.Никитенко, О.М.Лебедь, Ю.В.Федоренко, Н.Г.Клейменова, Ю.Маннинен, Л.И.Громова , Т. Турунен	Анализ аврорального онч хисса в обс. Ловозеро и вблизи обс. Соданкюля	71
Е.В Пархимович, Ю.В Романовская, О.В.Золотов	Разработка программного средства компьютерного анализа данных наблюдений с целью выявления аномальных вариаций полного электронного содержания ионосферы над сейсмоактивными регионами	75
Ю.В. Платов, С.А. Черноус	Влияние дисперсной компоненты в продуктах сгорания ракетных двигателей на масштаб возмущений, создаваемых в верхней атмосфере	78
С.И. Свертилов, М.И. Панасюк, А.А.Белов, А.В. Богомолов, В.В. Богомолов, Г.К Гарипов, Е.С. Горбовской, А.Ф, Июдин, М.А. Казначеева, В.В.Калегаев, П.А. Климов, В.М. Липунов, И.А.Максимов, А.В.Минаев, В.И. Оседло, М.В.Подзолко, В.Л. Петров, И.А. Рубинштейн, К.Ю.Салеев, В.И. Тулупов, Я.А.Штундер, И.В. Яшин	Мониторинг космической радиации и атмосферных транзиентов в полярных областях в мульти-спутниковом проекте МГУ «УНИВЕРСАТ-СОКРАТ».	81
В.А. Соловей, А.А. Захаров, Д.С. Карлов, С.А. Булат, В. И. Семенихин	Система обеспечения электропитания автономной удаленной автоматической станции для сбора космической пыли на станции восток в Антарктиде	85

А.В. Тертышников	Вариант схемы зондирования состояния полярной магнитосферы на основе малого КА и технологии морского буя	88
А.В. Тертышников, В.В. Удриш, И.И. Иванов, Я.В. Глухов, Д.С. Ковалев, В.М. Смирнов	Результаты проекта по зондированию аврорального овала по сигналам Глонасс с Баренцбурга	90
А.Г. Тлатов, А.В. Тертышников	Прогнозирование параметров космической погоды на основе данных наземных наблюдений солнечной активности	94
А.Л. Харитонов	Использование комплекса спутниковых и наземных магнитных измерений для геолого-геофизического изучения арктического региона	98
С.А. Черноус, И.И. Шагимуратов, В.В. Алпатов, М.В. Филатов, П.А. Будников, И.И. Ефишов, Ю.В. Федоренко	Авроральный овал и овал неоднородностей полного электронного содержания в различных гелиогеофизических условиях	102
А.П. Яковлев, В.Ф. Григорьев	Магнитный биологический эффект воздействия электромагнитного поля с частотой 8 гц на поведение и двигательную активность серого тюленя	106
В.Г. Янке, Ю.В. Балабин, Ю.П. Очелков	Дрейфующая станция космических лучей на базе платформы “СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС”	110
Т.А. Яхнина, Н.В.Семенова, А.Г. Яхнин	Связь высыпаний релятивистских электронов разных типов с геомагнитной активностью	114
О.В. Антоненко, А.С.Кириллов, Ю.Н Куликов.	Образование и гашение состояний Герцберга молекулярного кислорода на высотах свечения ночного неба Земли.	118

…Идолопоклонническое суеверие
держало астрономическую Землю в своих челюстях,
не давая ей двигаться...
...Везде исследуйте всечасно,
Что есть велико и прекрасно...
М.В. Ломоносов



Анна Михайлова «Полет шамана» (www.annamikhaylova.ru), печатается с разрешения автора

Устные и стендовые доклады по секциям:

- **Фундаментальные исследования причинно-следственных связей солнечной активности с возмущениями магнитосферно-ионосферной системы (космической погодой)**
- **Воздействие космической погоды на ионосферу и верхнюю атмосферу Арктики. Активные эксперименты**
- **Влияние гелиогеофизических факторов на технические системы и биосферу полярных и приполярных областей Земли**
- **Методы и средства мониторинга космической погоды, рекомендации по ее прогнозу с целью парирования негативных последствий**
- **Прикладные вопросы гелиогеофизики**
- **Комплексная сеть наблюдательных средств и базы оперативных гелиогеофизических данных в арктическом регионе РФ**

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 11-14
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.11-14

ЗАВИСИМОСТЬ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ ОТ УРОВНЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОБОЛОЧКЕ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ОБЛАКА

Н.А. Бархатов[1], В.Г. Воробьев[2], С.Е. Ревунов[1], О.И. Ягодкина[2]

[1]*Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, Н. Новгород (e-mail: nbarkhatov@inbox.ru)*
[2]*Полярный Геофизический Институт, Апатиты*

Аннотация. Выполнено исследование зависимости суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака. Известно, что турбулентные явления в оболочке во многом определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к ММП поглощаемому ударной волной при ее распространении в солнечном ветре. В связи с этим существуют термины квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударной волны, напрямую связанные с уровнем турбулентности в оболочке, следующей за ударной волной. Предлагаемый нами оригинальный метод поиска в солнечном ветре ударных волн в потоке данных с КА и установления ориентации их ударных плоскостей позволяет сделать вывод о степени возмущенности оболочки. Эти результаты использованы для поиска зависимости суббуревой активности от ориентации фронтов ударных волн магнитных облаков солнечного ветра. Показано, что в случаях квазипараллельных ударных волн интенсивность суббуревых процессов нарастает.

Abstract. A study of dependence sub-storm activity by turbulent movements level in the sheath of interplanetary magnetic cloud was made. It is known that sheath turbulent phenomena are largely determined by orientation of the shock wave plane relative to IMF absorbed by the shock wave during its propagation in the solar wind. In this regard, there are terms of quasi-parallel and quasi-perpendicular shock wave, directly related to turbulence level of sheath following the shock wave. Our proposed original method of searching shock waves in the solar wind in data stream from the spacecraft and establishing the orientation of their shock planes allows us to conclude about the disturbing degree of sheath. These results to search for dependence of substorm activity by orientation of magnetic clouds shock wave fronts in solar wind were used. It is shown that in cases of quasi-parallel shock waves, the intensity of sub-storm processes increases.

Введение

Магнитные облака солнечного ветра являются проявлениями солнечной активности вызывающими самые заметные геомагнитные возмущения. Это объясняется тем, что они отличаются наличием областей с сильным регулярным ММП и резкими фронтами. Исследования показали, что во многих случаях тело магнитного облака предваряется ударной волной на переднем фронте облака. При этом между ударной волной и ведущим краем магнитного облака регистрируется турбулентная оболочка. В связи с этим представляет интерес изучение связи геомагнитной активности со структурой магнитного облака. В предлагаемом исследовании устанавливается зависимость уровня высокоширотной геомагнитной активности от интенсивности турбулентных процессов, происходящих на переднем крае магнитного облака. В свою очередь, турбулентные явления в оболочке магнитного облака во многом определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к ММП поглощаемому ударной волной при ее распространении в солнечном ветре. Принято различать термины квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударной волны, ассоциированные с уровнем турбулентности в оболочке, следующей за ударной волной. Поэтому необходимой частью исследования является предлагаемый нами метод поиска ударных волн в потоке солнечного ветра по данным КА. Обнаружение и расчет ориентации их ударных плоскостей позволяют сделать вывод и о степени возмущенности турбулентной оболочки. В свою очередь степень возмущенности оболочки магнитных облаков сопоставляется с уровнем интенсивности суббуревых процессов.

Условия турбулентных движений в оболочке облака и ориентация фронтов ударных волн

Интенсивность волновых движений в оболочке магнитных облаков в значительной мере определяется проникающим в нее ММП, несмотря на то, что энергия магнитного поля в солнечном ветре на 1-2 порядка меньше динамической энергии потока плазмы. Согласно граничным условиям на ударной волне и уравнению непрерывности $\rho V = const$ за ударной волной скорость плазмы резко падает (в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой), а тангенциальная составляющая магнитного поля существенно возрастает. Магнитное

поле будет подавлять развитие волновых движений плазмы в оболочке облака при выполнении одного из неравенств [1]:

$$\left(\frac{\mathbf{B}_1\times\mathbf{V}_1}{V_1V_2}\right)^2 >> 4\pi\rho_2\frac{V_2^2}{V_1^2} \quad \text{или} \quad \left(\frac{\mathbf{B}_1\cdot\mathbf{V}_1}{V_1}\right)^2 >> 4\pi\rho_2V_2^2,$$

где V_1 и V_2 – скорости потока перед УВ и за ней в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой, соответственно, B_1 – напряженность магнитного поля перед ударной волной. Оценка плотностей энергии магнитного поля и динамической энергии плазмы в оболочке облака, позволяет сделать вывод о наличии или отсутствии в ней турбулентных движений.

Необходимым условием формулировки выводов об уровне турбулентности в оболочке является установление фактов ударных волн у рассматриваемых магнитных облаков, что делается по ранее разработанной методике [2]. Ориентации обнаруженных ударных фронтов МО определяются аналогично работе [3]. На рис. 1 схематично продемонстрирована методика определения положения фронта ударной волны. В пространстве компонент ММП (Bx, By, Bz) векторами $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$, $\mathbf{B}_3$ и $\mathbf{B}_4$ указаны полные векторы магнитного поля в четыре момента времени t_1, t_2, t_3 и t_4. Поскольку используются минутные данные, то ситуация на рис. 1 описывает четырехминутный интервал. При этом $\mathbf{B}_2$ и $\mathbf{B}_3$ отвечают векторам до и после плоскости ударного фронта. Согласно условиям на фронте МГД ударной волны величина нормальной составляющей ММП к поверхности фронта УВ неизменна, поэтому вектор $\Delta\mathbf{B}_{23}$, показывающий изменения величины ММП, лежит в плоскости фронта ударной волны. Максимальное значение этого вектора является одним из признаков регистрации фронта ударной волны, наряду со скачками плотности и скорости потока плазмы. Исходя из этих соображений, мы определяем положение разрыва.

Ориентация фронта ударной волны связанной с облаком может быть установлена по одномерным измерениям ММП и параметров солнечного ветра до ударной волны и после нее с помощью теоремы о компланарности ММП [4], согласно которой нормаль к ударной волне параллельна векторному произведению

$$\mathbf{N} = \Delta\mathbf{B}_{23}\times\left(\mathbf{B}_2\times\mathbf{B}_3\right),$$

где $\mathbf{B}_2$ – магнитное поле перед ударной волной, $\mathbf{B}_3$ – магнитное поле за ней, $\Delta\mathbf{B}_{23} = \mathbf{B}_3 - \mathbf{B}_2$. Таким образом, вектор $\Delta\mathbf{B}_{23}$ перпендикулярен вектору, нормальному к плоскости ударной волны, который обозначен на рис. 1 стрелкой с индексом **n** параллельным **N**. Для выводов о квазипараллельности или квазиперпендикулярности ударных волн рассматриваемых событий для нас будут представлять интерес значения угла ξ между векторами $\mathbf{B}_2$ и **n**, которые несложно вычисляются на основе скалярного произведения этих векторов.

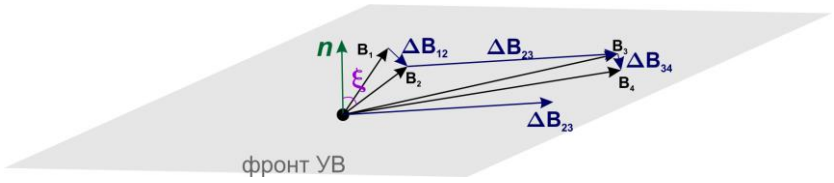


Рисунок 1. Определение положения фронта ударной волны в пространстве величин компонент ММП (Bx, By, Bz). ξ - угол между нормалью к плоскости ударной волны и вектором ММП, имеющим вектора $\mathbf{B_2}$ и $\mathbf{B_3}$ до и после разрыва, соответственно

Зная положение фронта УВ и прослеживая в потоке данных изменение угла между вектором ММП $\mathbf{B}_2$ и нормалью **n** к ударной волне, можно сделать вывод о квазипараллельности ($\xi \le 30°$) или квазиперпендикулярности ($\xi \ge 60°$) ударной волны и связать её ориентацию с уровнем магнитной активности в авроральной зоне.

Сопоставление уровней турбулентности в оболочке магнитных облаков с уровнем суббуревой активности

Проверка методики выполнена с использованием данных, отвечающих интервалам наблюдений быстрых магнитных облаков с ударными волнами и турбулентной областью – всего 33 случая, зарегистрированных в 1998-2012 гг. Для исследования использованы с 1-мин разрешением параметры: концентрация N и скорость солнечного ветра V и компоненты вектора B(Bx, By, Bz) ММП в GSM системе координат, и значения AL индекса полярных электроджетов, характеризующего уровень суббуревой магнитной активности (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov). Отдельно рассмотрены наиболее сильные (13/06/1998, 19/10/1998, 06/11/2000) и

слабые (21/04/2001, 30/09/2001, 19/11/2007) суббуревые проявления. При этом суббуревая активность оценивалась интегральным значением AL индекса за период от момента обнаружения УВ до начала тела МО, т.е. на интервале, отвечающем переходной области.

Результат анализа полученных расчетов показал, что события квазиперпендикулярных УВ характеризуются углами ξ, лежащими в интервале 70-80^0, события квазипараллельных УВ, демонстрируют небольшие углы ξ в среднем 25^0. Большие углы для квазиперпендикулярных УВ при неизменной нормальной составляющей магнитного поля приводят к заметному увеличению модуля ММП в переходной области, которые согласно [1] должны стабилизировать в ней турбулентные движения. На рис. 2 показаны вариации углов ξ между вектором ММП и нормалью к ударной волне до и после регистрации фронта УВ для рассматриваемых событий: (а, б, в) – события со слабой суббуревой активностью; (г, д, е) - со значительной суббуревой активностью. Вертикальной линией по центру показан момент регистрации фронта УВ. Маркерами выделены анализируемые точки отвечающие углам ξ непосредственно перед фронтом ударной волны. Дата события указана в правом верхнем углу каждого графика. Случаи регистрации углов больше 90° отвечают ситуации разворота расчетной плоскости фронта УВ.

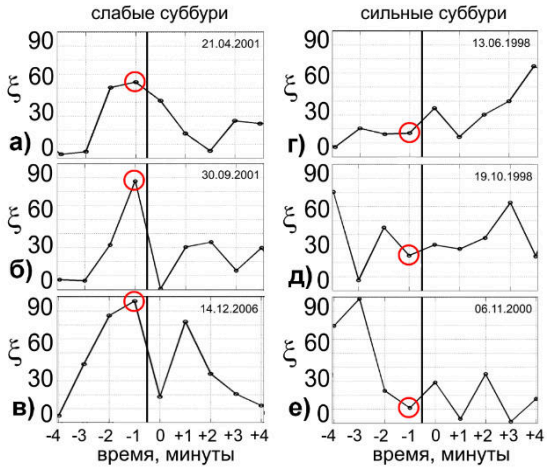


Рисунок 2. Примеры вариаций углов ξ между вектором ММП и нормалью к ударной волне до и после регистрации фронта УВ: (а, б, в) – события со слабой суббуревой активностью; (г, д, е) - со значительной суббуревой активностью. Вертикальной линией по центру показан момент регистрации фронта УВ. Маркерами выделены анализируемые точки отвечающие углам ξ непосредственно перед фронтом ударной волны. Дата события указана в правом верхнем углу каждого графика.

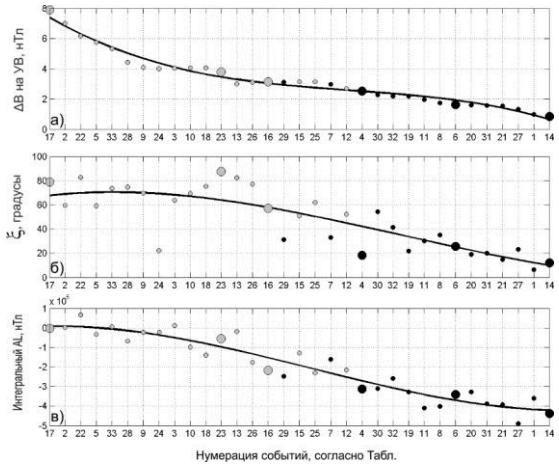


Рисунок 3. Динамика углов ξ между вектором ММП и нормалью к фронту УВ (а); величины скачков ММП на УВ (б); значений интегрального AL (в). Серые точки - квазиперпендикулярные УВ, черные точки - квазипараллельные УВ (большие кружки соответствуют событиям на рис. 3), сплошные прямые – аппроксимация полиномом 3 порядка для всех анализируемых 33 случаев МО. Распределение событий выполнено с учетом сортировки величин скачков ММП на УВ.

Полученные результаты подкрепляются анализом динамики углов ξ между вектором ММП и нормалью к фронту УВ, величины скачков модуля ММП ΔB на УВ и значений интегрального AL. Эта динамика

приведена на рис. 3. Большие углы ξ для квазиперпендикулярных УВ при неизменной нормальной составляющей магнитного поля приводят к заметному скачку ММП. Напротив, малые углы ξ для квазипараллельных случаев вызывают малые изменения модуля ММП. Это означает, что большие значения модуля магнитного поля ΔB за ударной волной стабилизируют волновые процессы в переходной области и понижают уровень интенсивности турбулентных движений [1]. Согласно рис. 3 эти значения отвечают наименьшей суббуревой активности. На рис. 3 показана динамика углов ξ между вектором ММП и нормалью к фронту УВ (а); величины скачков ММП на УВ (б); значений интегрального AL (в). Серые точки - квазиперпендикулярные УВ, черные точки - квазипараллельные УВ (большие кружки соответствуют событиям на рис. 2), сплошные прямые – аппроксимация полиномом 3 порядка для всех анализируемых 33 случаев МО. Распределение событий выполнено с учетом сортировки величин скачков ММП на УВ.

No	**date**	**No**	**date**	**No**	**date**
1	06.01.1998	12	03.10.2000	**23**	**14.12.2006**
2	04.03.1998	13	28.10.2000	24	19.11.2007
3	01.05.1998	**14**	**06.11.2000**	25	05.04.2010
4	**13.06.1998**	15	19.03.2001	26	28.05.2010
5	24.09.1998	**16**	**21.04.2001**	27	03.08.2010
6	**19.10.1998**	**17**	**30.09.2001**	28	14.02.2011
7	18.02.1999	18	18.03.2002	29	30.03.2011
8	16.04.1999	19	17.04.2002	30	05.06.2011
9	20.02.2000	20	20.03.2003	31	25.10.2011
10	15.07.2000	21	14.06.2005	32	22.01.2012
11	10.08.2000	22	13.04.2006	33	23.04.2012

Таблица. Анализируемые события регистрации быстрых МО (жирным выделены реперные события)

Заключение

В работе продемонстрировано, что в случаях квазипараллельных ударных волн магнитных облаков солнечного ветра интенсивность суббуревых процессов нарастает. Это означает, что наши представления о связи суббуревой активности с уровнем турбулентных процессов в оболочке, следующей за ударным фронтом магнитных облаков, подтверждаются экспериментально. Интенсивность турбулентных процессов в оболочках во многом определяется ориентацией фронтов ударных волн по отношению к вектору межпланетного магнитного поля и в случаях квазипараллельных ударных волн она особенно велика. Таким образом, уровень суббуревой активности следует за уровнем турбулентности в оболочке магнитных облаков и определяется ориентацией фронтов ударных волн по отношению к ММП.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ №16-05-00608, №18-35-00430 и Госзадания Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9 (Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов).

Литература

1. Бархатов Н.А., Беллюстин Н.С., Бужере Ж.-Л., Сахаров С.Ю., Токарев Ю.В. Влияние магнитного поля солнечного ветра на турбулентность переходной области за отошедшей ударной волной // Известия ВУЗов "Радиофизика". Т. 44. № 12. С. 993-1002. 2001.
2. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Нейросетевая классификация разрывов параметров космической плазмы. Научное издание: Солнечно-земная физика. Выпуск 14(127). С. 42–51. 2010.
3. Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Геомагнетизм и аэрономия, Т 58, 2018 (прошла рецензирование)
4. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир, 302 с. 1976.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 15-18.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.15-18

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ СВЯЗИ ДИНАМИКИ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Н.А. Бархатов[1], В.Г. Воробьев[2], С.Е. Ревунов[1], О.И. Ягодкина[2]

[1]*Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, Н. Новгород (e-mail: nbarkhatov@inbox.ru)*
[2]*Полярный Геофизический Институт, Апатиты*

Аннотация. Нейросетевыми методами исследуются причинно-следственные связи динамики высокоширотной геомагнитной активности (по индексу AL) с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. При этом особое внимание обращено на характеристики действующего на магнитосферу плазменного потока типа магнитного облака. Для описания процесса формирования суббури наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра успешно использован сформированный из них интегральный параметр. Продемонстрированная эффективность восстановления динамики AL по используемым данным указывает на наличие тесной нелинейной связи AL индекса с параметрами коронального плазменного потока.

Abstract. Cause-and-effect relations of dynamics for high-latitude geomagnetic activity (AL index) with solar wind plasma parameters and interplanetary magnetic field are investigated using neural network methods. At the same time, special attention is paid to characteristics of the plasma stream type like as magnetic cloud acting on the magnetosphere. To describe the process of substorm formation along with other geoeffective parameters of solar wind, the integral parameter formed from them has been successfully used. The demonstrated efficiency of restoring dynamics of AL from used data indicates the presence of a close nonlinear relationship between AL index and coronal plasma flow parameters.

Введение

При изучении суббурь основное внимание в настоящее время сосредоточено на природе изолированных суббуревых процессов [1]. Большинство работ опираются на статистические исследования и методы спектрального анализа наблюдательных данных. Вместе с тем, высокоэффективным методом восстановления и прогноза высокоширотных геомагнитных возмущений может считаться использование нейросетевого подхода, в рамках которого используются данные о динамике околоземного пространства. Эффективность этого метода продемонстрирована на численных нейросетевых экспериментах по восстановлению динамики AL индекса по параметрам солнечного ветра и ММП в работе [2].

В настоящем исследовании устанавливается причинно-следственная связь динамики высокоширотной геомагнитной активности, описываемой индексом AL, с данными об изменениях параметров солнечных плазменных потоков, регистрируемых патрульными космическими аппаратами. В качестве исследуемых потоков выбраны межпланетные магнитные облака (ММО), как наиболее геоэффективные корональные образования. Несмотря на многообразие конфигураций магнитных облаков и способов их воздействия на земную магнитосферу, зависящих в том числе и от прицельных параметров облака, обязательной особенностью является поворот вектора ММП внутри облака, что обеспечивает возникновение геоэффективной отрицательной Bz компоненты. Последнее, однако, не означает, что ММО всегда вызывают глобальные магнитные бури, но с ними часто бывают связаны суббуревые процессы [3]. Структура быстрых магнитных облаков заметно усложняется возникновением ударной волны и турбулентной области за ней. В связи с этим представляет интерес установление степени участия элементов структуры магнитных облаков при формировании высокоширотной геомагнитной активности. В данном исследовании, как и в [2], мы применяем нейросетевой подход с использованием рекуррентной нейронной сети типа Элмана. Как и ранее, здесь предполагается создание быстрой нейросетевой модели основанной на поиске оптимальных физически связанных входных и выходных параметров, характеризующих воздействие на магнитосферу конкретного плазменного потока, зависящего от типа магнитного облака. Однако особенностью данного исследования является использование разных нейросетевых архитектур.

Используемые данные и поиск оптимальной нейросетевой модели

Исследование выполнено с использованием минутных данных, отвечающих интервалам наблюдений 52-х межпланетных магнитных облаков, зарегистрированных в 1998-2012 гг. Для каждого интервала ММО анализировались параметры солнечного ветра: концентрация N и скорость плазмы V и компоненты вектора B (Bx, By, Bz) межпланетного магнитного поля в GSM системе координат, а также значения Dst и AL индексов магнитной активности. Все данные взяты с 1-мин разрешением с узла http://cdaweb.gsfc.nasa.gov. Анализируемые интервалы ММО были разделены на две выборки: группа 1 – быстрые облака с ударными волнами и турбулентной областью (33 случая) и группа 2 – медленные облака без ударных волн и турбулентных областей (19 случаев). Дополнительно были проанализированы интервалы данных (группа 3 - 70 случаев), соответствующие изолированным магнитосферным суббурям по показаниям индекса AL без уточнения типа плазменного потока, но заведомо не связанным с магнитными облаками.
Выполняемые нейросетевые эксперименты посвящены поиску оптимальных физически связанных входных и выходных параметров, характеризующих воздействие на магнитосферу рассматриваемых магнитных облаков. При этом определялись характерные времена необходимой предыстории динамики параметров облаков для запуска суббурь. В численных экспериментах лучшие результаты продемонстрировала нейросеть с петлей внешней обратной связи. Такая архитектура позволяет подкреплять обучение синтезируемыми внутри ИНС последовательностями AL-индекса (рис. 1).

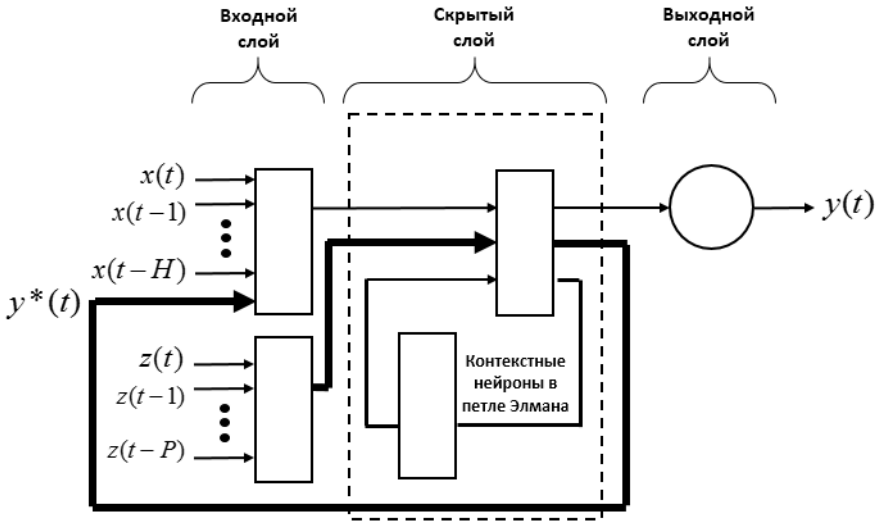


Рисунок 1. Архитектура ИНС Элмана с внешней петлей обратной связи. Входы x и z позволяют моделировать разное время задержки *H* и *P* соответственно. Внешняя петля обратной связи показана жирными линиями, на ней синтезируются последовательности y*(t), подаваемые на основной вход.

Входы *x* и *z* позволяют моделировать разную глубину предыстории *H* и *P* соответственно. Под глубиной предыстории понимается дополнительное количество параметров на входе нейронной сети, моделирующих временную задержку. Внешняя петля обратной связи показана жирными линиями, на ней синтезируются последовательности *y*(t)*, подаваемые на основной вход. На входе *z* глубина предыстории составляет *P*=60 минут. Такая задержка на внешней петле выбрана на основании исследования эффекта накопления энергии солнечного ветра для обеспечения суббуревого процесса [2]. На входе *x* глубина предыстории *H* может варьироваться. Единственный выходной нейрон *y* генерирует последовательность значений AL индекса. Поиск оптимальной глубины предыстории на входе *x* для входных последовательностей компонент ММП проводился от 30 до 90 минут с шагом 10 минут. Объективная оценка качества восстановления AL индекса выполнялась путем вычисления классического коэффициента корреляции R и эффективности восстановления PE [4] между реальными (целевыми) и сгенерированными нейронной сетью значениями. В результате было установлено, что 90 мин предыстория динамики By и Bz компонент ММП оказалась наиболее эффективна для моделирования последовательностей значений AL (рис. 2).

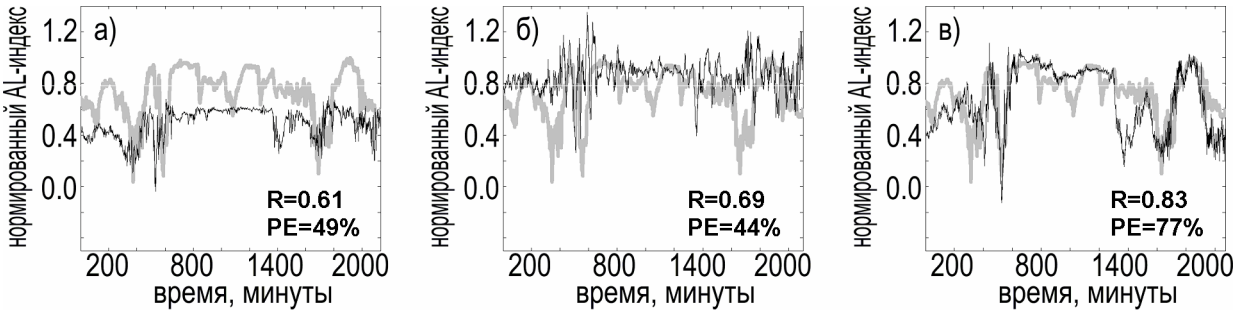


Рисунок 2. Сопоставление реальных значений AL индекса (серая кривая) и смоделированных ИНС (черная кривая) для разной глубины предыстории процесса; (а) - предыстория 30 мин; (б) - предыстория 60 мин; (в) - предыстория 90 мин. По оси абсцисс – время в минутах, по оси ординат – нормированные значения индекса AL.

Обсуждение результатов численных нейросетевых экспериментов

Выполненные численные эксперименты с помощью ИНС для группы данных 1 дали средние значения R=0.80, PE=77% и для группы 2 R=0.92, PE=81%. Таким образом обнаружено, что с использованием нейронных сетей наблюдается эффект управления высокоширотной геомагнитной активностью параметрами магнитного поля облака. Показанная в экспериментах 90 мин необходимость предыстории комбинации компонент ММП для эффективного восстановления AL индекса косвенно указывает на зависимость динамики суббуревой активности от структуры крупномасштабной конфигурации магнитного поля облака на орбите Земли. Созданная избыточность входного массива стабилизирует ИНС, что демонстрируется высоким качеством синтеза амплитудных значений на выходе. На рис. 3 показан пример сопоставления реальных значений AL-индекса (серая кривая) и смоделированных ИНС (черная кривая) для двух зарегистрированных событий. По оси абсцисс представлено время в минутах, по оси ординат – нормированные значения индекса AL.

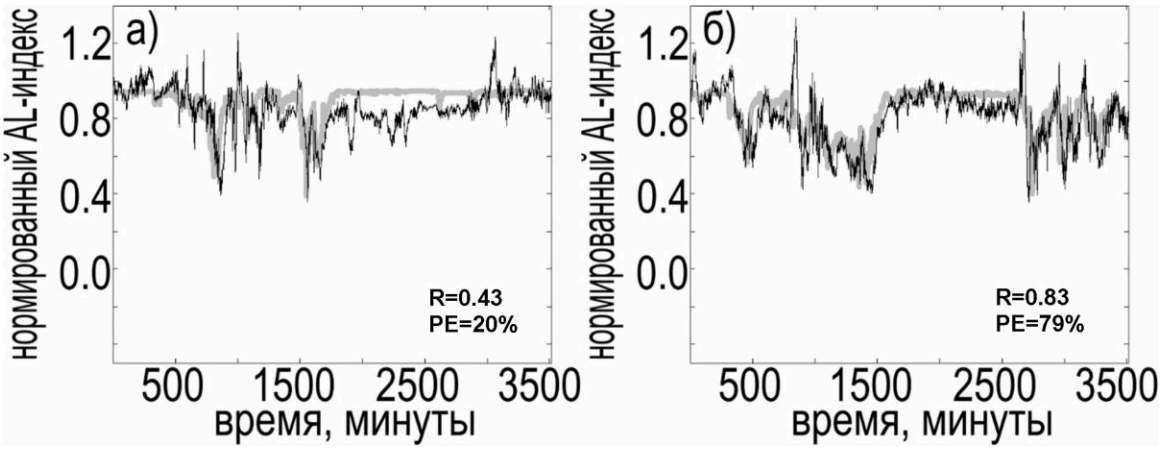


Рисунок 3. Сопоставление реальных значений AL-индекса (серая кривая) и смоделированных ИНС № 2 (черная кривая); (а) - демонстрация восстановления AL индекса 20 февраля 2000 г.; (б) - демонстрация восстановления AL индекса 15 июня 2005 г. По оси абсцисс – время в минутах, по оси ординат – нормированные значения индекса AL.

Выводы, полученные при постановке численных нейросетевых экспериментов по восстановлению AL индекса, свидетельствуют о возможности использования ИНС в роли детектора магнитных облаков. Созданная нейронная сеть, использующая параметры ММП в интервалах, отвечающих магнитным облакам, способна успешно сгенерировать на выходе динамику AL индекса, сопоставимую с реальной ситуацией. Далее, мы проверяем возможности ИНС на интервалах данных группы 3 (70 случаев), соответствующих изолированным магнитосферным суббурям, заведомо не связанными магнитными облаками. Как показывают результаты, если на входы ИНС будут подаваться интервалы данных, не отвечающие магнитным облакам (группа 3), то качество восстановления динамики индекса AL резко падает, даже если в качестве обучающего массива использовать данные этой же группы (R~0.3, PE~5%.). Это позволяет заявить, что найденная архитектура сети могут быть применены в задачах отождествления солнечных плазменных потоков с магнитными облаками.

Заключение

Основные выводы проведенного исследования можно сформулировать в следующих пунктах:
1. Использование By и Bz компонент ММП, отвечающих магнитному облаку с учетом 90 мин предыстории в качестве входных параметров нейросетевой модели достаточно для восстановления последовательности AL индекса.
2. Архитектура ИНС Элмана с внешней петлей обратной связи демонстрирует удовлетворительное восстановление AL индекса.
3. Разработанная модель восстановления AL индекса может быть использована в задачах отождествления солнечных плазменных потоков с магнитными облаками, т.к. только интервалы данных, отвечающие магнитным облакам, способны успешно сгенерировать на выходе модели AL индекс, сопоставимый с реальной ситуацией. Это проверено на интервалах данных группы 3, отвечающих, по показаниям индекса AL изолированным магнитосферным суббурям, заведомо не связанным с магнитными облаками.

Проведенные исследования показали, что для восстановления последовательности AL индекса с эффективностью до 80% достаточно использование в качестве входных параметров нейросетевой модели By и Bz компонент ММП с учетом их 90 мин предыстории. Это означает, что в периоды взаимодействия магнитосферы Земли с магнитными облаками существует тесная нелинейная связь между уровнем магнитной активности в высоких широтах и динамикой By и Bz компонент ММП. Созданная нейросетевая модель с высокой эффективностью может быть применена для восстановления как отдельных суббурь, так и суббурь, вызванных медленными магнитными облаками [2].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ №16-05-00608, №18-35-00430 и Госзадания Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9 (Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов).

Литература

1. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 721-732. DOI:10.7868/S001679401606016X. 2016.
2. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. №3. С. 273–279. 2017.
3. Henderson M.G., Reeves G.D., Belian R.D., Murphree J.SD. Observations of magnetospheric substorms occurring with no apparent solar wind/IMF trigger//J. Geophys. Res. V. 101.No. A5. P. 10773-10792. DOI:10.1029/95JA00186. 1996.
4. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Искусственные нейронные сети в задачах солнечно-земной физики. Монография. Изд-во «Поволжье», 407 с. 2010.

« Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 19-22.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.19-22

ВНЕМАГНИТОСФЕРНЫЙ АГЕНТ СИНХРОННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ В ИНТЕРВАЛЫ СУББУРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

О.М. Бархатова[1,2], Н.В. Косолапова[2], Н.А. Бархатов[2]

[1] *Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород (e-mail: o.barkhatova@inbox.ru)*
[2] *Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, Нижний Новгород*

Аннотация. Выполненная работа посвящена поиску синхронной ионосферной и геомагнитной МГД возмущенности в ночное время при значительной суббуревой активности. Исследование проведено в интервалы интенсивных суббурь, вызванных турбулентными оболочками магнитных облаков (МО), следующими за ударными волнами. В работе проверяется предположение о том, что за низкочастотные МГД ночные возмущения в геомагнитном поле и ионосфере, происходящие на фоне суббуревых процессов, несет ответственность внемагнитосферный волновой агент, находящийся в околоземном космическом пространстве. Низкочастотные МГД возмущения могут передаваться из оболочки облака в магнитосферу Земли с ночной стороны через токовую систему «клина суббури», которая включает в себя токи хвоста магнитосферы, токи вдоль силовых линий и западный электроджет. Эта токовая система возникает в возмущенной магнитосфере в периоды взрывной фазы магнитосферной суббури и связывает ее активные области с высокоширотной ионосферой. Возникающая при этом нестабильность электроджета может генерировать МГД возмущенность низких частот в ионосфере и геомагнитном поле.

Abstract. The work is devoted to the search for synchronous ionospheric and geomagnetic MHD disturbances at night time with considerable sub-storm activity. The study was conducted in the intervals of intense substorms caused by the MC (magnetic cloud) turbulent sheathes following the shock waves. This paper tests the assumption that nighttime low-frequency MHD disturbances in the geomagnetic field and ionosphere occurring against the background of substorm processes are responsible for the out-magnetospheric wave agent located in near-Earth space. Low-frequency MHD disturbances can be transferred from the cloud sheath to the Earth's magnetosphere from the night side through the substorm wedge current system which includes tail currents of the magnetosphere, field aligned currents and the westward electrojet. This current system appears in the disturbed magnetosphere during the explosive phase periods of magnetospheric substorm and connects its active regions with the high-latitude ionosphere. The resulting electrojet instability can generate low-frequency MHD disturbances in the ionosphere and geomagnetic field.

Используемые данные и методы исследования

Возможность генерации ночных МГД возмущений в ионосфере и геомагнитном поле турбулентными явлениями оболочек МО продемонстрирована на семи событиях облаков с ударными волнами, вызывающих развитие магнитосферных суббурь: 10.08.2000, 20.03.2003, 03.08.2000, 06.11.2000, 14.06.2005, 18.02.1999, 05.04.2010. Для обнаружения МГД ионосферно-геомагнитных возмущений были использованы данные TEC с GPS станций и значения H-компоненты геомагнитного поля на магнитных обсерваториях, расположенных в ночном секторе LT. Анализ внемагнитосферной возмущенности выполнен по данным солнечного ветра (концентрация протонов, скорость) и межпланетного магнитного поля (компоненты Bx, By, Bz). Волновые явления изучались в течение двухчасового интервала после регистрации на космическом аппарате ударных волн. В эти интервалы всегда наблюдалась суббуревая активность, которая оценивалась по значениям индекса AL. Характерные периоды и времена появления вне- и внутримагнитосферных МГД возмущений устанавливались с использованием метода вейвлет-анализа с базовой функцией Добеши 4 порядка.

Внемагнитосферная МГД возмущенность

Поиск и спектральный анализ низкочастотных МГД возмущений в параметрах солнечного ветра и в компонентах межпланетного магнитного поля выполнен в интервалы времени, соответствующие прохождению Земли через оболочки рассматриваемых 7 событий МО. В качестве примера, рассмотрим МО с ударной волной, зарегистрированное 06 ноября 2000 г. и вызвавшее последовательность интенсивных суббурь. На рассматриваемом временном интервале AL_{max} ~ -1300 нТл. Время регистрации ударной волны на космическом аппарате – 09.40 UT. На рисунке 1 (а) сверху вниз представлены вейвлет-спектры компонент

межпланетного магнитного поля (Bx, By, Bz), концентрации (N) протонов солнечного ветра и его скорости (V). Анализ спектров параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля показывает наличие синхронных низкочастотных колебаний плазмы и магнитного поля с периодами от 15 до 30 минут при прохождении космического аппарата через ударную волну (интервал 9.40 – 10.20 UT). Эта область выделена на рисунке 1 (а) прямоугольником. В оболочке МО (после 10.30) UT регистрируются синхронные магнитные возмущения во всех компонентах ММП с периодами 25-30 минут и концентрации солнечного ветра с периодами 15-20 минут.

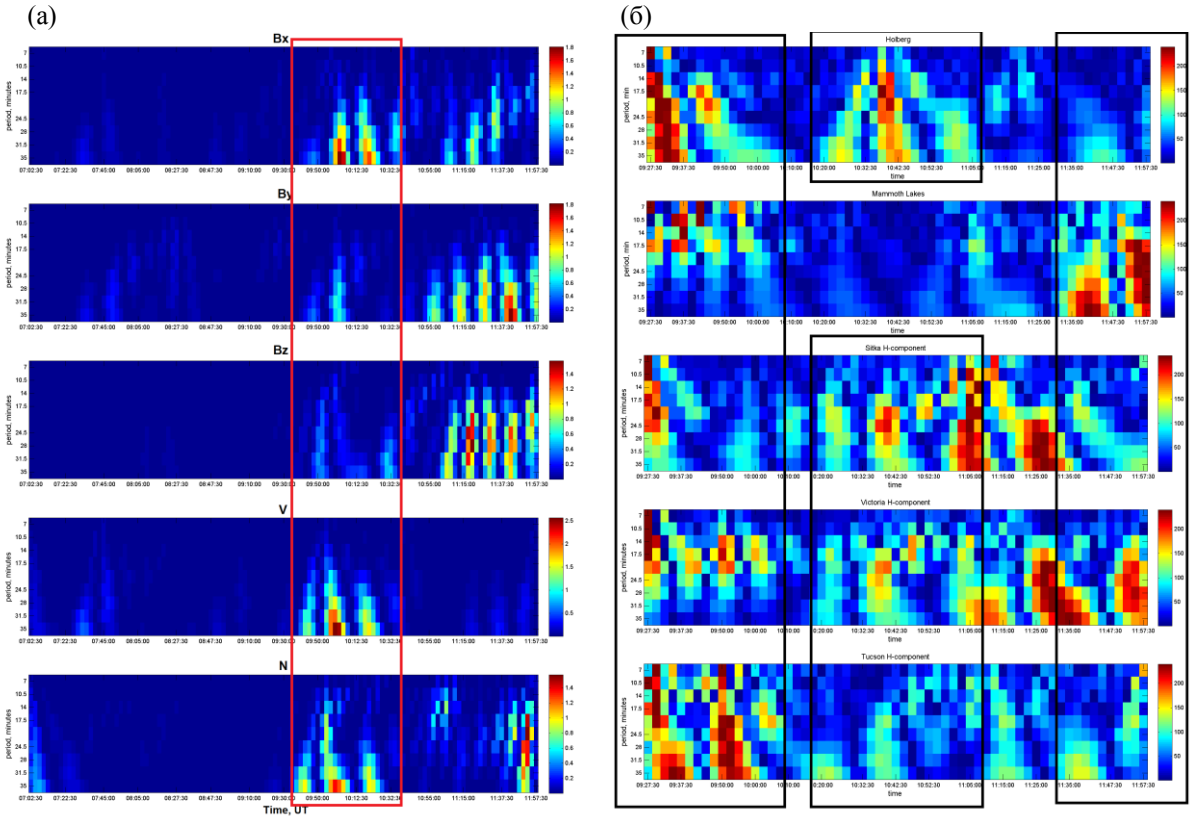


Рис. 1. (а) Вейвлет-спектры Bx, By и Bz компонент межпланетного магнитного поля, концентрации протонов солнечного ветра и его скорости для события 06 ноября 2000 г; (б) Вейвлет-спектры TEC станций Holberg (50.6° с.ш., 128.4° в.д., L = 2.87), Mammoth Lakes (37.6° с.ш., 119° в.д., L = 1.84) и H-компоненты геомагнитного поля станций Sitka (57.1° с.ш., 135.3° з.д., L = 3.8), Victoria (48.5° с.ш., 123.4° з.д., L = 2.7), Tucson (32.2° с.ш., 111° з.д., L = 1.66) для события 06 ноября 2000 г

Ионосферно-магнитосферная МГД возмущенность

Выводы анализа ионосферных и магнитных вейвлет-спектров свидетельствуют о наличии одновременных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле с периодами от 15 до 30 минут для всех рассматриваемых событий. В качестве примера на рисунке 1(б) представлены вейвлет-спектры вариаций TEC с GPS станций Holberg (50.6 с.ш., 128.4 з.д., L = 2.87) и Mammoth Lakes (37.6 с.ш., 119 з.д., L = 1.84) и H-компоненты геомагнитного поля со станций Sitka (57.1 с.ш., 135.3 з.д., L = 3.8), Victoria (48.5 с.ш., 123.4 з.д., L = 2.7) и Tucson (32.2 с.ш., 111 з.д., L = 1.66) для события 06 ноября 2000 г в интервале с 09.20 до 12.00 UT. Согласно представленным результатам, имеют место одновременные максимумы спектров TEC и геомагнитного поля. Область прохождения ударной волны с 09.20 до 10.10 UT отмечена на рисунке 2 черным прямоугольником. После 10.20 UT прямоугольниками выделены области синхронных возмущений ионосферной плазмы и горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Эти интервалы соответствуют прохождению Земли через турбулентную оболочку МО.

Исследование показало, что в период воздействия оболочки МО на магнитосферу, зарегистрированы синхронные ионосферные и геомагнитные возмущения. Это может свидетельствовать об их общей МГД природе. Периоды обнаруженных волновых МГД возмущений лежат в интервале 10 – 35 минут. Это свидетельствует о причинно-следственной связи турбулентных возмущений в оболочке МО с возникновением МГД возмущений в ионосферно-магнитосферной системе. Справедливость этого утверждения была проверена исследованием ионосферно-магнтосферной возмущенности для интервала времени, предшествующего ударной волне зарегистрированной в 09.40 UT 06 ноября 2000 г.

Продолжительность анализируемого интервала составляла порядка часа и в этот период суббуревая активность не регистрировалась (AL < -100 нТл). На рисунке 2 (а) представлены вейвлет-спектры компонент ММП, концентрации и скорости солнечного ветра. В рассматриваемом частотном диапазоне возмущенность наблюдается для всех параметров. Рисунок 2 (б) демонстрирует спектральные особенности возмущений на наземных ионосферных и магнитных станциях. Сопоставление времен регистрации плазменной и гемагнитной возмущенности показывает, что синхронность между ними отсутствует.

Таким образом, можно заключить, что МГД возмущенность в околоземном космическом пространстве присутствует практически всегда. Однако в ионосферно-магнитосферную систему эти возмущения в отсутсвие суббури не проникают. В областях, связанных с магнитными облаками (ударная волна и оболочка), МГД возмущения более интенсивны и одновременно создаются условия для развития последовательности суббурь. Именно в эти периоды на земле регистрируются интенсивные синхронные возмущения ионосферной плазмы и геомагнитного поля.

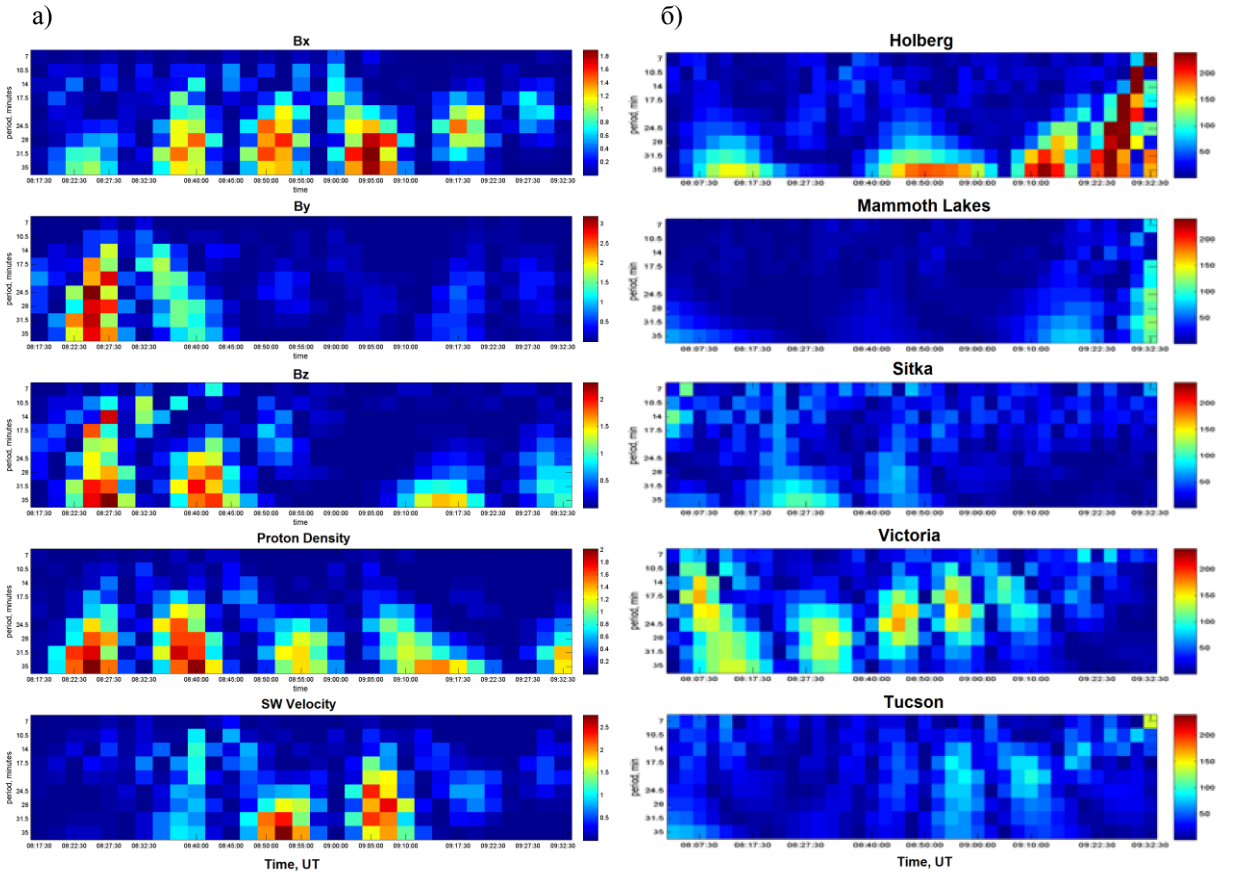


Рис. 2. (а) Вейвлет-спектры Bx, By и Bz компонент межпланетного магнитного поля, концентрации протонов солнечного ветра и его скорости; (б) Вейвлет-спектры TEC станций Holberg (50.6° с.ш., 128.4° в.д., L = 2.87), Mammoth Lakes (37.6° с.ш., 119° в.д., L = 1.84) и H-компоненты геомагнитного поля станций Sitka (57.1° с.ш., 135.3° з.д., L = 3.8), Victoria (48.5° с.ш., 123.4° з.д., L = 2.7), Tucson (32.2° с.ш., 111° з.д., L = 1.66) для события 06 ноября 2000 г, временной интервал 08.10-09.30 UT

Выводы и обсуждение

В данном исследовании выполнен параллельный анализ низкочастотных ионосферных, геомагнитных и околоземных МГД возмущений в интервалы суббуревой активности. Последовательности интенсивных суббурь во всех рассматриваемых случаях вызывались турбулентными оболочками магнитных облаков, следующими за их ударными волнами. Спектральный состав параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля показал наличие интенсивных низкочастотных МГД колебаний с периодами 10 – 35 минут при прохождении земной магнитосферы, как через ударную волну, так и через оболочку облака. В эти же интервалы сопоставлением спектральных картин вариаций TEC и горизонтальной компоненты геомагнитного поля для всех событий магнитных облаков обнаружены синхронные спектральные максимумы в ионосферных и геомагнитных возмущениях с периодами от 10 до 35 минут. Синхронность геомагнитных и ионосферных возмущений свидетельствует об их общей МГД природе. Полученные результаты согласуются выводами выполненной нами ранее работы [1].

Мы полагаем, что существует возможность проникновения МГД колебаний из солнечного ветра в систему магнитосфера-ионосфера с ночной стороны через хвост магнитосферы. Согласно рассматриваемой нами физической модели, под воздействием возмущенного замагниченного солнечного ветра геомагнитный хвост магнитосферы может передать эти колебания западному электроджету (AL), который является частью трехмерной токовой системы токового клина суббури. Активный электроджет, в свою очередь, может являться источником обнаруженных МГД возмущений низких частот.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №16-05-00608, №18-35-00430 и Госзадания Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9.

Литература

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

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 23-26.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.23-26

КРАТКОВРЕМЕННЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА СПУТНИКЕ «ЛОМОНОСОВ»

В.В. Богомолов[1, 2], А.В. Богомолов[1], Г.К. Гарипов[1], А.Ф. Июдин[1], И.А. Максимов[1], А.В. Минаев[1], М.И. Панасюк[1,2], В.Л. Петров[1], С.И. Свертилов[1,2], И.В. Яшин[1]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына*
[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет*

Аннотация. В ходе космических экспериментов на спутнике «Ломоносов проводились наблюдения вспышек гамма-излучения из атмосферы Земли. Спутник « «Ломоносов» был выведен 28 апреля 2016 г. на солнечно-синхронную орбиту, круговую с высотой 490 км, наклонением 98.4° и периодом обращения 90 мин. Наблюдения вспышек гамма-излучения из атмосферы Земли осуществлялись с помощью спектрометра жесткого рентгеновского, гамма-излучения БДРГ, состоящего из трех идентичных блоков детектирования и блока электроники. Каждый блок детектирования прибора БДРГ имел высокочувствительный сцинтилляционный фосвич-детектор NaI(Tl)/CsI(Tl) площадью ~120 см^2, обеспечивающий регистрацию рентгеновских и гамма-всплесков в диапазоне от 10 кэВ до 3 МэВ. В ходе эксперимента предусмотрена как непрерывная запись скорости счета регистрируемых частиц и квантов с временным разрешением ~100 мс, так и фиксация времени регистрации каждого гамма-кванта с точностью ~15 мкс, а также их энергии. Особенности орбиты космического аппарата «Ломоносов» позволяют вести наблюдения в различных областях околоземного пространства, включая полярные регионы. Это создает уникальную возможность исследовать проявления высотных разрядов, включая вспышки гамма-излучения в областях, заведомо далеких от зон активного грозообразования. Обсуждаются результаты подобных наблюдений и возможная связь вспышек гамма-излучения, наблюдаемых, в высокоширотных областях с высыпаниями магнитосферных электронов.

Abstract. During the space experiments on board the Lomonosov satellite, observations were made of gamma-ray bursts from the Earth's atmosphere. The satellite "Lomonosov" was launched on April 28, 2016 into a sun-synchronous orbit, circular with an altitude of 490 km, an inclination of 98.4 ° and an orbital period of 90 minutes. Observations of gamma-ray bursts from the Earth's atmosphere were carried out using a hard X- and gamma-ray spectrometer BDRG, consisting of three identical detection units and an electronics unit. Each detecting unit of the BDRG device is a high sensitive NaI (Tl)/CsI (Tl) scintillation detector with an area of ~ 120 cm^2, which can detect X- and gamma ray bursts in the range from 10 keV to 3 MeV. During the experiment, both continuous recording of the counting rate of detected particles and quanta with a time resolution of ~100 ms and fixing the time of each gamma quantum detection with an accuracy of ~ 15 μs and their energy is provided. The orbital parameters of the Lomonosov spacecraft make it possible to conduct observations in various areas of near-Earth space, including the Polar Regions. This gives a unique opportunity to study the manifestations of high-altitude discharges, including gamma-ray flashes in areas that are known to be far from areas of active thunderstorm formation. The results of such observations and the possible connection of gamma-ray flashes observed in high-latitude regions with precipitations of magnetospheric electrons are discussed.

Введение

Изучение электромагнитных разрядов является на сегодня актуальной, активно развивающейся областью исследований, что особенно заметно по работам в области атмосферной физики высоких энергий. Основные направления таковых исследований базируются на хорошо установленном факте, что грозовые облака, и собственно молниевые разряды, очень часто сопровождаются мощными потоками энергичных частиц, и особенно рентгеновского и гамма-излучения. Это излучение проявляется в виде быстро переменных событий длительностью от менее микросекунды для рентгеновских всплесков сопровождающих так-называемых лидеров молнии, или всплесков гамма-излучения длительностью в доли миллисекунды, в случае атмосферных гамма-всплесков, и до десятков минут повышений интенсивности рентгеновского и гамма-излучения регистрируемого от грозового облака наземными установками, или приборами, установленными на самолеты или на высотные аэростаты различных размеров и назначения. В этом плане особый интерес представляют, так называемые, вспышки гамма-излучения земного происхождения (Terrestrial Gamma-Ray

Flashes, TGF), которые, по-видимому, генерируются внутри или около грозовых облаков и характеризуются очень высокой интенсивностью и энергией наблюдаемых фотонов. В условиях этих TGF, сильным электрическим полем генерируются и ускоряются электроны, иногда до энергий достигающих 100 МэВ. Эти электроны регистрируются затем как тормозное излучение в виде фотонов рентгеновского и гамма-диапазонов. В свою очередь, электроны, ускоренные до суб-релятивистских и релятивистских энергий, могут захватываться в радиационный пояс, высыпаться из радиационного пояса, образовывать при этом вторичные электроны и позитроны, также наблюдаемые в спутниковых экспериментах. Тем не менее, вопрос о том где конкретно ускоряются эти электроны до релятивистских энергий - на лидерах грозового разряда, в грозовых облаках, или между облаками, или над грозовыми облаками [1-3], остается актуальным, и до сих пор не нашел своего уверенного и подтвержденного двумя, или большим числом экспериментов ответа. Возможно, что ускорение происходит во всех трех предложенных механизмах, но остается неясной величина предельно достигаемой энергии ускорения, и форма спектров ускоренных в грозовых комплексах частиц.

Для ответа на поставленные вопросы особый интерес представляют наблюдения вспышек гамма излучения из атмосферы Земли вне зон активного грозообразования. В последнее время в результате наблюдений, выполненных на спутниках «Вернов» и «Ломоносов», на высоких широтах и в полярных областях были обнаружены кратковременные возрастания потоков гамма-излучения, которые возможно не связаны с грозовой активностью. Природа этих явлений пока достоверно не известна, однако не исключено, что они могут быть связаны с высыпаниями магнитосферных электронов.

В настоящей работе рассматриваются результаты поиска кратковременных возрастаний потоков гамма-квантов из атмосферы Земли за пределами приэкваториальных областей на спутнике «Ломоносов» [4], который был запущен 28 апреля 2016 г. с космодрома «Восточный» на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой ~500 км.

Аппаратура для регистрации гамма всплесков на спутнике «Ломоносов»

Для регистрации гамма-всплесков на спутнике «Ломоносов» используется прибор БДРГ [5], который состоит из трех идентичных блоков детектирования БДРГ-1, …, БДРГ-3 и блока электроники БА-БДРГ. Последний обеспечивает связь с основным блоком электроники БИ, в том числе подачу на блоки детектирования питания и управляющих команд, формирование выходных массивов данных и их трансляцию в БИ.

Каждый блок детектирования включает детекторный узел, платы электроники и элементы механической конструкции. Детекторные узлы представляют собой сборку из сцинтилляторов NaI(Tl)/CsI(Tl) диаметром 13 см и полной толщиной 2 см (при этом толщина кристалла NaI(Tl) – 0.3 см, кристалла CsI(Tl) – 1.7 см). Оба сцинтиллятора находятся в оптическом контакте и просматриваются со стороны CsI(Tl) одним фотоэлектронным умножителем (ФЭУ Hammamatsu R877). Подобная компоновка позволяет за счет разного времени высвечивания (~0.25 мкс для кристалла NaI(Tl), ~2 мкс для кристалла CsI(Tl)) эффективно разделять события в обоих сцинтилляторах и тем самым с одной стороны существенно уменьшить регистрацию фоновых гамма-квантов в тонком кристалле NaI(Tl) и расширить энергетический диапазон, благодаря использованию толстого кристалла CsI(Tl) с другой. Использование сборки NaI(Tl)/CsI(Tl) также дает принципиальную возможность разделять события, связанные с регистрацией всплесков собственно гамма-излучения и высыпаний магнитосферных электронов.

Прибор БДРГ обеспечивает регистрацию гамма-квантов в диапазоне энергий 10-3000 МэВ при эффективной площади каждого детекторного узла ~130 см^2. Для величин фоновых потоков, наблюдаемых в приэкваториальных областях околоземного пространства указанная эффективная площадь соответствует чувствительности к регистрации всплеска на уровне ~10^{-7} эрг/см^2. Оси трех блоков детектирования разнесены в пространстве под углами 90^o друг относительно друга, образуя как бы Декартову систему координат. Это дает возможность по соотношению показаний отдельных детекторов определять направление на источник регистрируемого всплеска. Прибор работает в двух режимах – мониторном и всплесковом. В мониторном режиме осуществляется непрерывная запись средних за 0.1 с скоростей счета в в энергетических интервалах для событий в каждом из кристаллов. Кроме того, с помощью многоканальных АЦП измеряются средние за 15 с энергетические спектры (также для обоих кристаллов). Во всплесковом режиме вырабатываются три типа триггера, различающиеся временем экспозиции, за которое накапливаются события для определения уровня превышения фона: 10 мс («быстрый»), 1 с («медленный»), 20 с («сверхмедленный»). По триггеру в районе момента его выработки осуществляется запись с большей подробностью как скоростей счета (до 1 мс), так и средних энергетических спектров (вплоть до 1 с), при этом для каждого регистрируемого события (кванта или частицы) осуществляется измерение амплитуд энерговыделений в обоих кристаллах – реализуется режим, так называемой, по-событийной записи (event by event).

Результаты наблюдений атмосферных гамма-всплесков на спутнике «Ломоносов»

Исходя из особенностей фона на орбите спутника «Ломоносов», гамма-всплески могли регистрироваться на приемлемом уровне чувствительности в основном в приэкваториальных областях и в районе, так называемой, полярной шапки, где фоновый уровень скорости счета был более или менее постоянным. При этом запись информации о всплеске реализовывалась по двухуровневым триггерам. Первый уровень характеризовался относительно низким порогом срабатывания, но при этом осуществлялась только более подробная по сравнению с мониторным режимом, фиксация выходных данных самого прибора БДРГ. В среднем за сутки имело место несколько десятков срабатываний такого типа. Большинство из них было обусловлено вариациями потоков электронов, в том числе высыпаниями из радиационных поясов. Триггеры второго уровня, так называемые, алертные, вырабатывались при существенно более высоком пороге и соблюдении ряда дополнительных условий, например, пребывание спутника заведомо вне зон захваченной радиации и высыпаний. По алертным триггерам не только записывались подробные выходные показания прибора БДРГ, но и осуществлялась фиксация данных других приборов спутника «Ломоносов», а также передавались быстрые телеграммы с данными о всплеске в сеть GCN через Globalstar модем.
Для поиска кратковременных возрастаний скорости счета гамма квантов использовались «по-событийные» данные, записанные после срабатывания триггеров. Наибольшее суммарное время экспозиции в «по-событийном» режиме получено для «сверхмедленных» триггеров. На рис. 1 представлена гистограмма распределения времени экспозиции в по-событийном режиме, включавшемся после срабатывания «сверхмедленного» триггера, в зависимости от уровня средней скорости счета в детекторах прибора БДРГ. Бимодальный характер распределения связан с наличием двух конкурирующих тенденций. С одной стороны с увеличением скорости счета увеличивается число, как случайных триггерных срабатываний, так и срабатываний, вызванных высыпаниями электронов, поскольку уровень фонового счета в значительной степени обусловлен именно потоками сопутствующих электронов. С другой стороны с увеличением фоновой скорости счета уменьшается вероятность появления алертных триггеров.

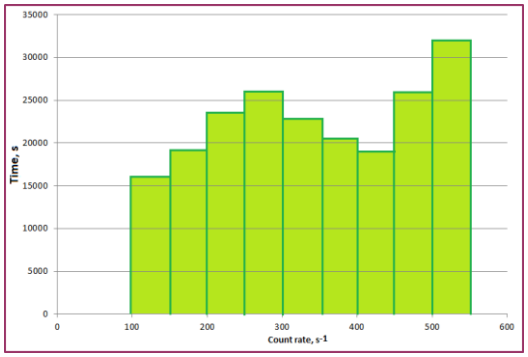


Рис. 1. Пример распределения времени экспозиции в по-событийном режиме, включавшемся после срабатывания «сверхмедленного» триггера, в зависимости от уровня средней скорости счета в детекторах прибора БДРГ. Распределение получено для интервала наблюдений с октября 2016 по январь 2017 гг.

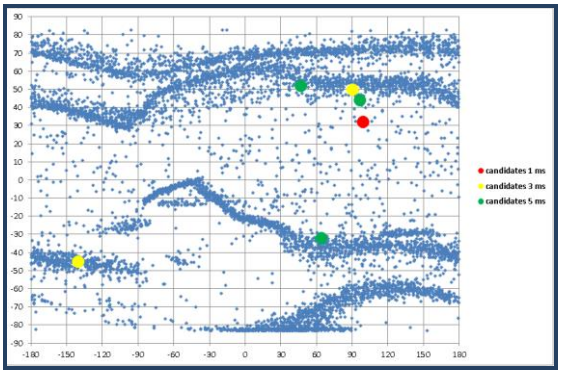


Рис. 2. Карта подспутниковых точек регистрации «сверхмедленных» триггеров (синие точки), красные кружки – места регистрации возрастаний на 1 мс интервале, желтые кружки - места регистрации возрастаний на 3 мс интервале, зеленые кружки - места регистрации возрастаний на 5 мс интервале.

Отбор возрастаний скорости счета – кандидатов в возможные вспышки гамма излучения из атмосферы Земли осуществлялся по показаниям событиям, зарегистрированным в кристалле CsI(Tl) детекторов прибора БДРГ,

поскольку именно эти кристаллы как бы обращены по направлению к Земле. Суммарный слой вещества под каждым кристаллом CsI(Tl) в основном определялся расположенными «под ним» фотоумножителем, платами электроники и элементами конструкции прибора, которые представляют собой вещества с относительно небольшим Z. При этом вклад конструкций самого космического аппарата не существенен, так как они выполнены в виде рамы, состоящей из относительно тонких трубок из углепластика. Таким образом, должно обеспечиваться относительно слабое поглощение гамма-квантов с энергиями более 100 кэВ, приходящих «снизу». Для отбора кандидатов в кратковременные вспышки гамма излучения использовались следующие критерии: если уровень средней скорости счета кристалле CsI(Tl) каждого детекторного узла прибора БДРГ не превышал 400 c^{-1}, в каждом из трех детекторов должно быть зарегистрировано более трех отчетов за 1 мс; если уровень средней скорости счета в кристаллах CsI(Tl) не превышал 300 c^{-1}, использовались два дополнительных условия – либо в каждом детекторе должно быть зарегистрировано более четырех отчетов за 3 мс, либо более 6 отсчетов в одном детекторе и более 5 отчетов в остальных двух за 5 мс.
Всего было отобрано 12 кандидатов во вспышки гамма-излучения из атмосферы Земли: 2 по первому критерию (т.е.длительностью менее 1 мс), одно для массива данных, полученных в результате срабатывания «быстрого» триггера и одно в результате срабатывания «сверхмедленного» триггера; 3 – по второму критерию (т.е. длительностью <3 мс), одно для массива, полученного по «медленным» триггерам, 2 – по «сверхмедленным»; 7 – по третьему критерию (т.е. длительностью <5 мс), 4 по «быстрым» триггерам, 3 – по «сверхмедленным». На рис. 2 приведена карта подспутниковых точек регистрации «сверхмедленных» триггеров с указанием мест регистрации кандидатов во вспышки гамма излучения из атмосферы Земли.

Обсуждение

Как видно из рис. 2, большинство срабатываний триггера связано с областями, примыкающим к внешнему и внутреннему (Южно-Атлантическая аномалия) радиационным поясам Земли – это, так называемые области квазизахваченных и высыпающихся частиц, главным образом электронов. Интересно отметить, что все отобранные кандидаты во вспышки гамма излучения регистрировались на широтах более 30°, т.е вне экваториальных областей, где обычно наблюдаются события типа TGF. Аналогичная картина имеет место и для кандидатов, отобранных из массивов данных, полученных по «медленным» и «быстрым» триггерам. Ранее, в результате наблюдений на спутнике «Вернов», был зарегистрирован всплеск гамма излучения над Антарктидой [6]. По длительности этот всплеск, также как и большинство отобранных событий по данным спутника «Ломоносов» отличается от типичных TGF, которые существенно более короткие (менее 0.5 мс). Таким образом, можно предположить, что, вероятно эти вспышки в отличие от TGF напрямую не связаны с грозовой активностью. Поскольку, как видно из рис. 2, они регистрируются вблизи областей высыпаний, можно допустить, что они могут быть обусловлены тормозным излучением, возникающим при попадании высыпающихся электронов в атмосферу Земли, хотя обычно подобные высыпания характеризуются существенно большими длительностями. Таким образом, прояснение природы кратковременных возрастаний потоков гамма излучения в высокоширотных областях требует дальнейших исследований.

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор №RFMEFI60717X0175).

Литература

1.Двайер и др. (Dwyer, Joseph R.; Smith, David M.; Cummer, Steven A.). High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, Sp.Sci.Rev., 2012, v. 173, p. 133-196.
2.Руссе-Дюпре, Гуревич (Roussel-Dupre R., Gurevich A.V.). On runaway breakdown and upward propagating discharges, JGR, 1996, v. 101, Issue A2, p. 2297-2312 .
3.Сингх и др. (Siingh D., Singh R.P., Kumar S., et al.). Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere, JASTP, 2015, v. 134, p.78-101.
4. Садовничий В.А., Амелюшкин А.М., Ангелопулос В. и др. Космические эксперименты на борту спутника МГУ «Ломоносов». Космические исследования, 2013. Т.51, №6, сс. 470–477 (Cosmic Res., pp. 427–433).
5. Svertilov S.I., M.I. Panasyuk, V.V. Bogomolov, et. al.. Wide-field gamma-spectrometer BDRG: GRB monitor on-board the Lomonosov mission. *Space Science Reviews*, 214(1):8, 2018
6. Bogomolov V.V., Panasyuk M.I., Svertilov S.I. et al.. Observation of terrestrial gamma-ray flashes with RELEC experiment of Vernov space mission. Cosmic Res. 2017. V 55, №3, p. 159 – 168
.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 27-30.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.27-30

ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.Н. Кузнецов, В.А. Шаповалов

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (e-mail: VVVahnina@yandex.ru)

Аннотация. Показано, наиболее интенсивному воздействию геоиндуцированных квазипостоянных токов подвержены силовые трансформаторы тупиковых подстанций при совпадении трассы воздушных линий электропередачи с направлением геоэлектрического поля и узловых подстанций, если трассы примыкающих воздушных линий электропередачи имеют различное географическое направление, одно из которых совпадает с направлением геоэлектрического поля. Реальной становится угроза нарушения режима передачи мощности по примыкающим линиям в периоды геомагнитных возмущений из-за многократного уменьшения индуктивного сопротивления ветви намагничивания и многократного увеличение полной мощности намагничивания. Возможно снижение предела передаваемой мощности на (10,7÷83,8)%.

Abstract. It is shown, that power transformers of tail substations are subjected to the most intense impact of geomagnetically induced quasi-direct currents, when the routings of overhead power lines coincides with the direction of the geoelectric field and for the tie-substations, if the routings of adjacent overhead power lines have a different geographic direction, but one of which coincides with the geoelectric field direction. Then the reality of threat rises with the violation of the power transfer mode along adjacent lines during periods of geomagnetic disturbances due to a multiple decrease in the inductance of the magnetizing branch and a multiple increase in the total magnetization power. And it could possibly cause the reduce of power transmition limit by (10.7,83.8)%.

Результаты и обсуждение

Проектирование и эксплуатация электроэнергетического оборудования, электрических сетей высокого напряжения осуществляется с учетом климатических факторов внешней среды, под которыми понимаются температура, влажность и давление (высота над уровнем моря) воздуха, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов, смены температур, солнечное излучение и др.

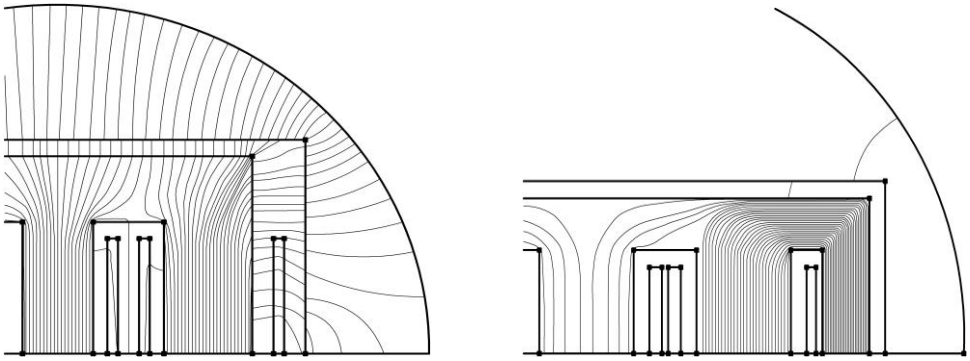
В соответствии с ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 16350-70 поверхность земного шара разделена на ряд макроклиматических районов, различных с точки зрения воздействия климатических факторов на технические изделия. В частности различают макроклиматические районы с умеренным климатом (климатическое исполнение изделий категории У), с умеренным и холодным климатом (климатическое исполнение изделий категории УХЛ), с влажным тропическим климатом (климатическое исполнение изделий категории ТВ), с сухим тропическим климатом (климатическое исполнение изделий категории ТС). Для электрических сетей высокого напряжения дополнительно осуществляется районирование климатических условий территории нашей страны по скоростному напору ветра, толщине гололедных образований, грозовой активности, интенсивности пляски проводов.

С развитием и усложнением топологии электрических сетей, связанным с увеличением количества электростанций и трансформаторных подстанций, протяженности воздушных линий электропередачи, расширением географической зоны размещения электроэнергетических объектов, возрастает влияние еще одного фактора внешней среды, а именно космической погоды. Во время внезапных изменений космической погоды между заземленными нейтралями силовых трансформаторов электрической сети возникает разность потенциалов, вызывающая протекание по обмоткам высокого напряжения и фазным проводам линий электропередач квазипостоянного тока. Последний принято называть геоиндуцированным током (ГИТ). Частота ГИТ не превышает 0,1 Гц. Это во много раз меньше номинальной частоты (50 Гц) напряжения электрической сети [1÷4].

Непосредственному воздействию ГИТ подвергаются силовые трансформаторы электрических сетей высокого напряжения, что объясняется особенностями режима функционирования магнитной системы при одновременном протекании по обмоткам высокого напряжения квазипостоянной (≤0,1 Гц) и переменной (50 Гц) составляющих тока (рис.1). Дело в том, что основная кривая намагничивания холоднокатаной электротехнической стали в диапазоне значений (0-3000) А/м напряженности магнитного поля имеет ярко выраженный «вентильный» характер с резким переходом между областями рабочего перемагничивания и технического насыщения. Поэтому под воздействием ГИТ происходит деформация тока намагничивания, который приобретает практически однополярную форму с амплитудой, многократно превышающей паспортное значение тока холостого хода силового трансформатора (рис.2). Величина ГИТ, достаточная для

смещения режима перемагничивания в область технического насыщения, зависит от конструктивного исполнения магнитной системы силового трансформатора.

На силовые трансформаторы со стержневой конструкцией магнитной системы такое воздействие могут оказать только ГИТ, величина которых близка и даже превышает номинальный ток обмотки высокого напряжения. У силовых трансформаторов с броневой и бронестержневой конструкциями магнитной системы сместить режим перемагничивания в область технического насыщения способны ГИТ, величина которых соизмерима с током холостого хода. Следует добавить, что такое конструктивное исполнение имеют наиболее крупные силовые трансформаторы номинальной мощностью более 100 МВА, отключение или повреждение которых из-за воздействия ГИТ может приводить к нарушению электроснабжения значительных объемов потребителей.



а) б)

Рис. 1 – Картина силовых линий магнитного поля в стержневой (а) и бронестержневой (б) магнитной системе при воздействии ГИТ

Деформация тока намагничивания приводит к появлению высших гармоник, как четных (2-й, 4-й, 6-й и т.д.), так и нечетных (3-й, 5-й, 7-й и т.д.) порядков. Уровень гармоник тока намагничивания зависит от величины фазового угла насыщения магнитной системы, которая определяет продолжительность протекания однополярного тока намагничивания на интервале периода напряжения электрической сети. При фазовом угле насыщения магнитной системы 180 *гр.* основная гармоника тока намагничивания достигает предельного значения и в (283÷316) раз превышает паспортное значение тока холостого хода силового трансформатора. При фазовом угле насыщения магнитной системы 90 *гр.* максимальные значения принимают амплитуды всех четных гармоник тока намагничивания, причем амплитуда второй гармоники достигает ≈43% амплитуды основной гармоники.

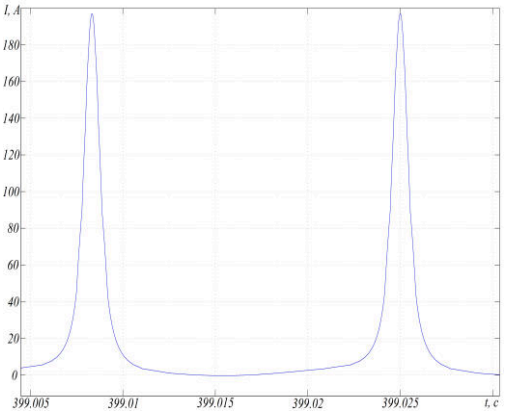


Рис. 2 – Кривая тока намагничивания силового трансформатора с бронестержневой конструкцией магнитной системы при воздействии ГИТ

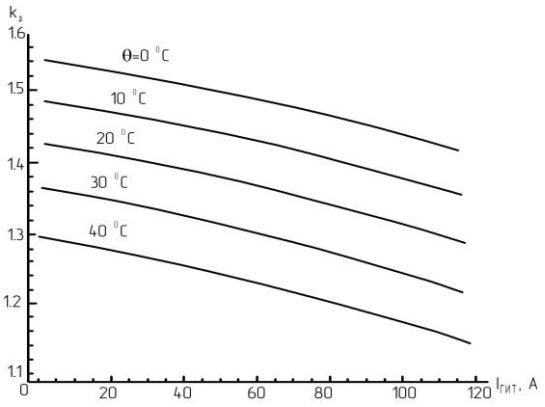


Рис. 3 – Допустимые уровни коэффициентов загрузки силового трансформатора ТДЦ-400000/242/20 в зависимости от ГИТ в обмотке ВН и температуры окружающего воздуха

За счет многократного возрастания под воздействием ГИТ тока намагничивания и появления высших гармоник возникают дополнительные потери активной мощности, которые могут нагреть металлические элементы конструкции и токоведущие части или локальные участки этих элементов выше предельной температуры и вызвать интенсивное газообразование. Наибольшее возрастание дополнительных потерь в присутствии ГИТ наблюдается в обмотках высокого напряжения. Дополнительные потери ограничивают нагрузочную способность силового трансформатора (рис.3). Например, для силового трансформатора ТДЦ-400000/220 при величине ГИТ ≈30 А и температуре окружающего воздуха 20°С допустима перегрузка не

более 42%, а при 40°С – не более 28%. Увеличение нагрузочной способности силовых трансформаторов выше установленных значений может привести к перегреву обмоток силового трансформатора и срабатыванию газовой защиты силового трансформатора на отключение.

Величина ГИТ, протекающих по обмоткам высокого напряжения силового трансформатора, в значительной степени зависит при прочих равных условиях от конфигурации примыкающей электрической сети. В частности, наиболее интенсивному воздействию ГИТ будут подвержены силовые трансформаторы:

- тупиковых подстанций при совпадении трассы воздушных линий электропередачи с направлением геоэлектрического поля;
- узловых подстанций, если трассы примыкающих воздушных линий электропередачи имеют различное географическое направление, одно из которых совпадает с направлением геоэлектрического поля.

Практически не подвержены воздействию ГИТ силовые трансформаторы проходных подстанций, если географическое направление воздушных линий электропередачи до и после подстанции остается неизменным.

Для подстанций с высокой степенью уязвимости силовых трансформаторов возникает угроза нарушения исходного режима передачи мощности по примыкающим линиям в периоды геомагнитных возмущений. Например, режим передачи активной мощности по межсистемной линии электропередачи с трансформаторными подстанциями, на которых установлены силовые трансформаторы с бронестержневой конструкцией магнитной системы (рис.4), должен определяться с учетом изменения индуктивностей намагничивания под воздействием ГИТ.

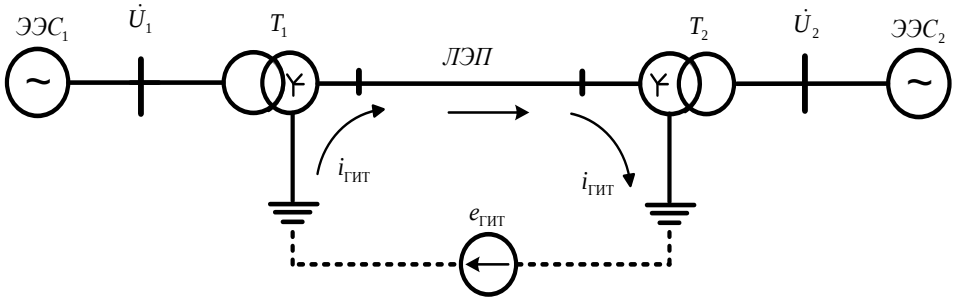


Рис. 4 – Принципиальная схема межсистемной электропередачи

По мере возрастания ГИТ происходит многократное уменьшение эквивалентного индуктивного сопротивления ветви намагничивания и многократное увеличение полной мощности намагничивания, которая образуется двумя составляющими – реактивной мощностью намагничивания, обусловленной основной гармоникой тока намагничивания, и мощностью искажения, обусловленной высшими гармониками тока намагничивания (рис.5). Наиболее существенное уменьшение эквивалентного индуктивного сопротивления ветви намагничивания и увеличение полной мощности намагничивания (в ≈ 33,4 раза) происходит при увеличении до 40 *гр*. фазового угла насыщения. Если фазовый угол продолжает увеличиваться (от 40 *гр*. до 120 *гр*.), то происходит дальнейшее уменьшение эквивалентного индуктивного сопротивления ветви намагничивания и увеличение полной мощности намагничивания (в ≈ 7,5 раз). В области «сильного насыщения» магнитной системы, когда фазовый угол насыщения увеличивается от 120 гр. до 180 гр., происходит лишь незначительное уменьшение эквивалентного индуктивного сопротивления ветви намагничивания только на ≈ 22,5% и увеличение полной мощности намагничивания только на ≈ 24,4%. Значения полной и реактивной мощности намагничивания в области «сильного насыщения» отличаются друг от друга не более, чем на 1%.

Уменьшение индуктивного сопротивления намагничивания силовых трансформаторов по мере возрастания ГИТ вызывает уменьшение предела передаваемой мощности межсистемной электропередачи, связывающей электроэнергетические системы $ЭЭС_1$ и $ЭЭС_2$ (рис.6). В зависимости от соотношения индуктивного сопротивления линии и индуктивного сопротивления короткого замыкания силового трансформатора возможно снижение предела передаваемой мощности на (10,7÷83,8)%.

При $\varphi \geq 50 гр.$ реактивная мощность начинает потребляться и из $ЭЭС_2$. С этого момента возрастающая мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2, а также и потери реактивной мощности в продольных индуктивных сопротивлениях электропередачи начинает покрываться за счет потребления реактивной мощности как из $ЭЭС_1$, так и из $ЭЭС_2$. В частности, при $\varphi = 180 гр.$ суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 на ≈ 60% покрывается потреблением реактивной мощности из $ЭЭС_1$ и на ≈ 40% потреблением реактивной мощности из $ЭЭС_2$. Однако это возможно только при наличии соответствующих резервов реактивной мощности. В противном случае геомагнитные возмущения при достаточной интенсивности способны инициировать развитие аварийной ситуации типа «лавина напряжения».

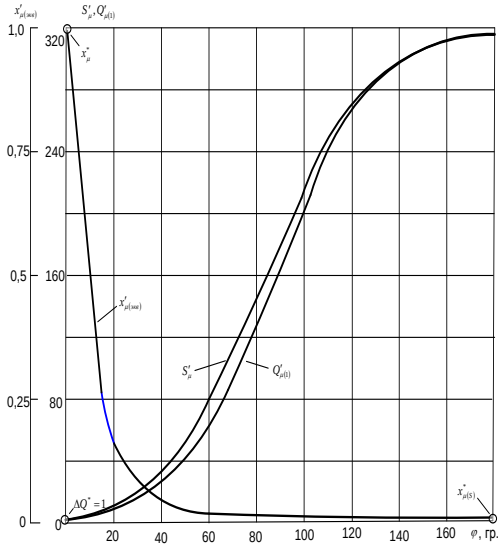


Рис. 5 – Зависимости полной S'_{μ}, реактивной $Q'_{\mu(1)}$ мощности и эквивалентного индуктивного сопротивления $x'_{\mu(\text{экв})}$ ветви намагничивания от значений фазового угла насыщения магнитной системы силового трансформатора

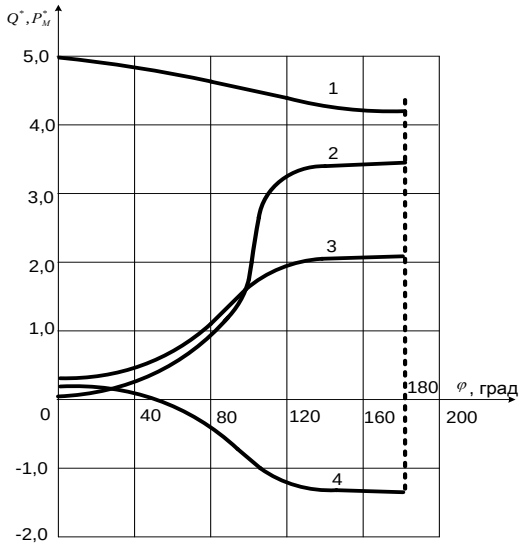


Рис. 6 – Энергетические характеристики электропередачи при воздействии ГИТ (1 – предел передаваемой мощности; 2 – суммарная мощность намагничивания силовых трансформато-; ров; 3 – реактивная мощность, выдаваемая ЭЭС$_1$; 4 – реактивная мощность, выдаваемая в (потребляемая из) ЭЭС$_2$)

Заключение

В настоящее время в России не существует систем диагностики, способных идентифицировать ГИТ, систем защиты силовых трансформаторов от воздействия ГИТ и инструкций по действиям персонала в подобных ситуациях. Возникает предположение, что более половины невыясненных причин отключений воздушных линий электропередач и ложного срабатывания релейной защиты и автоматики возможны из-за протекания ГИТ. Однако такое предположение не подтверждается актами и отчетами по технологическим нарушениям. Это объясняется тем, что в списке классификационных признаков, включенных в «Инструкцию по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей» и в причинах возникновения аварий «Правил расследования аварий в электроэнергетике», отсутствует одна – влияние ГИТ на режимы работы электрических сетей. Поэтому для снижения рисков развития системных аварий необходимо обеспечить безаварийное функционирование силовых трансформаторов за счет непрерывного мониторинга ГИТ.

Литература

1. Boteller D.H. Effect of geomagnetically inducted current B.C. Hydro 500 kV – System. – IEEE Trans. Power Deliv., 1989, vol.4, №1. P.818-823.
2. Pirjola R. Effect of interaction between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission systems. – Earth Planet Space, 2008, №60. P.743-751.
3. Molinski, T.S. Why utilities respect geomagnetically induced currents. – JASTP, 2002, vol.64, №16. P. 1765 – 1778.
4. Chandrasena W., Melaren P.G., Annakkage U.D.,Jayasinghe R.P. Modeling GIC effect on Power systems: the need to model magnetic status of transformers. – Paper accepted for presentation at 2003 IEEE Bologna Power tech Conference, June 23th-26th, Bologna, Italy.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 31-34.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.31-34

ОСОБЕННОСТИ ГЛОБАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО ТЕХНОГЕННОГО СВЕЧЕНИЯ ДНЕВНОЙ И НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА СПУТНИКЕ «ВЕРНОВ»

Г.К. Гарипов[1], М.И. Панасюк[1,2], С.И. Свертилов[1,2], В.В. Богомолов[1,2], В.О.Баринова[1], К.Ю. Салеев [1,2]

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет

Аннотация. При изучении оптических явлений в атмосфере с помощью детектора оптического излучения установленного на борту спутника «Вернов» были зарегистрированы техногенные сигналы в виде модуляции свечения атмосферы излучением радиостанций низкой частоты. На ночной стороне орбиты спутника географическое распределение этих сигналов также вытянуто в меридиональном направлении, и наблюдается при совпадении плоскости орбиты спутника с долготами географических координат наиболее мощных радиостанций низкой частоты. На дневной стороне орбиты спутника географическое распределение сигналов также вытягивается вдоль меридианов, но на границе ночной и дневной стороны орбиты спутника географическое распределение становится равномерным по долготам. Кроме того, географические координаты границ областей техногенного свечения становятся неустойчивыми, смещаются и северные и южные границы географического распределения от Северного полюса до Южного полюса, а в средних и низких широтах в распределениях этих сигналов вдоль меридианов наблюдаются зоны со случайными географическими координатами, где техногенное свечение отсутствует полностью, а также наблюдаются области техногенного свечения пространственные размеры которых не превышают несколько десятков километров.

Abstract. When studying optical phenomena in the atmosphere with the help of an optical radiation detector installed onboard the Vernov satellite, technogenic signals were detected in the form of modulation of the atmospheric emission by radiation from low-frequency radio stations. On the night side of the satellite orbit, the geographical distribution of these signals is elongated in the meridional direction, and is observed when the satellite orbital plane coincides with the longitudes of the geographical coordinates of the most powerful low-frequency radio stations. On the day side of the satellite orbit, the geographical distribution of signals is drawn along the meridians, but on the border of the night and day side of the satellite orbit, the geographical distribution becomes uniform in longitude. In addition, the geographical coordinates of the areas of technogenic glow become unstable, the northern and southern boundaries of the geographical distribution from the North Pole to the South Pole are shifted. Also in middle and low latitudes, distributions of these signals along the meridians are observed with random geographic coordinates where there is no technogenic glow completely, as well as observed the field of man-made illumination of the spatial dimensions which do not exceed a few tens of kilometers.

Введение

Оптическое излучение Земли содержит информацию о явлениях, происходящих, и в атмосфере и в околоземном космическом пространстве, возникающих как при воздействии электромагнитных полей молний, так и при воздействии излучений мощных радиостанций.

В работе [1] были представлены данные наблюдений техногенных сигналов оптического излучения на ночной стороне орбиты спутника «Вернов». Как один из возможных источников этих сигналов рассматривалось свечение, которое возникает под воздействием электромагнитных полей современных мощных НЧ-радиостанций, воздействующих на ионосферу и ускоряющих электроны до энергий, достаточных для возбуждения оптического излучения молекул ионосферы. Было показано, что регистрируется излучение молекул азота на высотах выше 150 км, что выше нижней границы ионосферы.

Радиоволны мощных радиостанций воздействуют на атмосферу также как электромагнитное излучение разряда молний. Действительно, максимум спектра радиоизлучения молний совпадает с частотами излучения НЧ-радиостанций и можно ожидать, что техногенное свечение возникает под действием радиостанций подобно тому, как транзиентные оптические явления возникают под действием радиоизлучения грозовых разрядов. Тем не менее, несмотря на то, что частоты природного и техногенного радиоизлучения совпадают,

в отличие от молний, радиоволны которых возбуждают свечение ограниченных размеров, свечение, вызванное мощными радиостанциями, наблюдалось на площадях соизмеримых с размерами Земли.
Важной особенностью радиоволн низкой частоты является и то, что это радиоизлучение в направление магнитного поля не отражается ионосферой, а проникает в околоземное космическое пространство, распространяясь вдоль магнитных силовых линий Земли. В ионосфере это излучение может вызывать свечение, распространяясь вдоль магнитного поля значительно выше нижней границы ионосферы более эффективно, поскольку с высотой быстро увеличивается длина свободного пробега электронов. В этом случае, их ускорение до энергий достаточных для возбуждения оптического излучения частиц ионосферы становится возможным на траекториях существенно большей длины при меньших напряженностях электрического поля радиоволн. Тем не менее, несмотря на то, что напряженность электрического поля радиоволн наиболее мощных НЧ-радиостанций достаточна для ускорения электронов до энергий необходимых для возбуждения оптического излучения в ионосфере, мощности радиоизлучения этих станций недостаточно для нагрева ионосферы и возбуждения свечения на всей площади его наблюдения, соизмеримой с размерами Земли [1]. Из этого следует, что такое свечение возникает не только из-за разогрева ионосферы электромагнитной волной радиостанций, но и вследствие других физических процессов, под действием которых усиливаются оптические эффекты от воздействия радиоволн низкой частоты.
В этой работе показано, что амплитуды осцилляций зарегистрированных оптических сигналов техногенного свечения пропорциональны освещенности атмосферы, а их частотный спектр совпадает с частотой модуляции несущей частоты радиоволн наиболее мощных низкочастотных передатчиков не зависимо от свечения атмосферы. на дневной и ночной сторонах орбиты спутника. При этом географические распределения этих сигналов, на дневной и ночной стороне орбиты спутника, существенно отличаются. Резкие изменения этих распределений происходят на границе теневого и освещенного Солнцем участка орбиты. На ночной стороне орбиты спутника географические распределения техногенного свечения вытянуты вдоль меридианов, долгота которых соответствует географической долготе наиболее мощных низкочастотных радиостанций, работающих в килогерцовом диапазоне длин волн [1]. На дневной стороне географические распределения техногенных сигналов также вытягиваются вдоль меридианов, но которые по долготе распределены равномерно, причем наиболее часто такие сигналы наблюдаются в высоких широтах, и относительно реже в районе Экватора.

Детектор ультрафиолетового и инфракрасного излучения

Детектор содержит два фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) с мультищелочными фотокатодами и эффективной площадью 0.5 $см^2$ у каждого. Один из них закрыт ультрафиолетовым фильтром УФС-2 и регистрирует сигналы в области длин волн 240-380 нм, а другой красным фильтром КС-11 и регистрирует сигналы в области длин волн 610-800 нм. Поля зрения обоих ФЭУ ограничены коллиматорами с углом обзора 20^0 и ориентированы в надир. Сигналы с анода ФЭУ с помощью аналогового мультиплексора подаются на вход 12 битового АЦП и преобразуются в цифровой код с частотой преобразования 2 МГц. Логика управления и запись одного события в память спутника осуществляется в ПЛИС. В каждом временном интервале длительностью 4.5 с, начиная с импульсов, вызванных флюктуациями свечения атмосферы, отбирается наиболее яркая вспышка и записывается в память спутника для последующей передачи на Землю в виде осциллограммы, содержащей 256 точек с шагом 0.5 мс. Время интегрирования сигнала в каждой точке равно шагу на осциллограмме. При измерениях сигналы регистрируются во всем диапазоне освещенностей атмосферы благодаря применению автоматической регулировки усиления (АРУ), которая фиксирует сигнал анодного тока ФЭУ в заданном канале АЦП так, что ток ФЭУ не превосходит величин, рекомендованных производителем. Постоянная времени АРУ превышает длительность вспышки, поэтому сигнал не искажается во время записи осциллограммы. Более подробно детектор описан в работе [2].

Глобальные распределения техногенных сигналов, наблюдавшиеся на дневной и ночной стороне орбиты спутника.

На рис.1 приведен пример осциллограммы техногенного свечения зарегистрированной на дневной стороне орбиты спутника. В этом примере осцилляции сигналов УФ- и ИК-излучений регистрируются практически синфазно, при этом временной сдвиг между осцилляциями составляет около 7 мс. Основные гармоники сигналов техногенного свечения в спектре Фурье, зарегистрированных на дневной и ночной стороне орбиты спутника, находятся в полосе частот 200±150 Гц, которые совпадают с частотами модуляции радиоволн излучения наиболее мощных низкочастотных радиостанций. Отметим, что регистрируется частота модуляции НЧ-радиостанций, а несущая частота радиостанций отфильтровывается, возможно, на этапе возбуждения техногенного свечения радиоизлучением в ионосфере из-за ее нелинейных свойств.

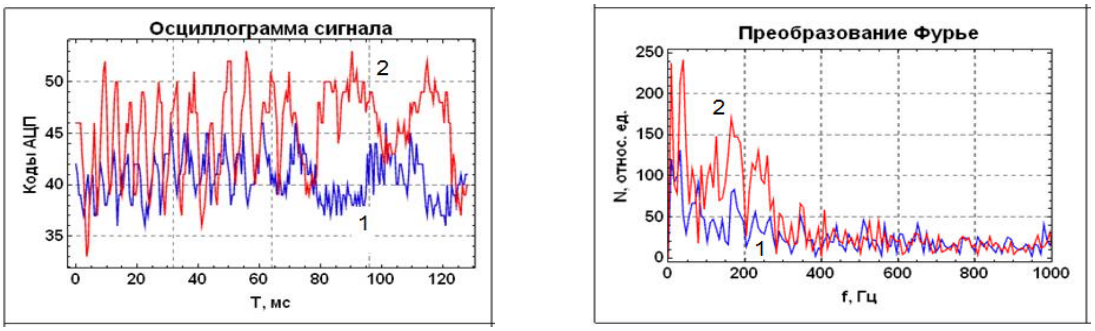


Рис. 1. Пример осциллограммы техногенного сигнала (левый рисунок) и спектра Фурье (правый рисунок) зарегистрированного 2014.11.20.в 02:35:03 на дневной стороне орбиты спутника над Северной Канадой с географическими координатами +69º, -106º (Ш, Д).
1 - сигнал УФ - излучения, 2 - сигнал ИК - излучения.

В соответствии с предположениями, что техногенное оптическое излучение возникает под действием НЧ-радиоволн, рассмотренными в [1], можно ожидать изменения географических распределений этого свечения в полярных зонах. Объясняется это тем, что в районе полюсов заканчиваются силовые линии околоземного магнитного поля, вдоль которых распространяются радиоволны низкой частоты, а на границе ночной и дневной стороны орбиты спутника под воздействием солнечного излучения изменяется число заряженных частиц в околоземной плазме, что также влияет на распространение радиоволн.
На рис. 2 приведены карты глобального распределения техногенного свечения 7 августа и 5 декабря 2014 года. Приведенные примеры интересны тем, что сигналы техногенного свечения наблюдались только в районе одного из полярных полюсов Земли. Как видно из рисунков в августе техногенное свечение в основном наблюдалось в районе Северного полюса, в декабре в районе Южного полюса. Причем с августа по декабрь на дневной стороне орбиты ежедневно наблюдалось смещение по широте как северных, так и южных границ техногенного свечения, при этом это распределение по долготе было равномерным и практически не изменялось в зависимости от времени наблюдений. На ночной стороне географическое распределение было подробно рассмотрено в работе [1], которое практически не изменялось по широте, а по долготам имело явно выраженные максимумы, совпадающие с географической долготой наиболее мощных НЧ - радиостанций.

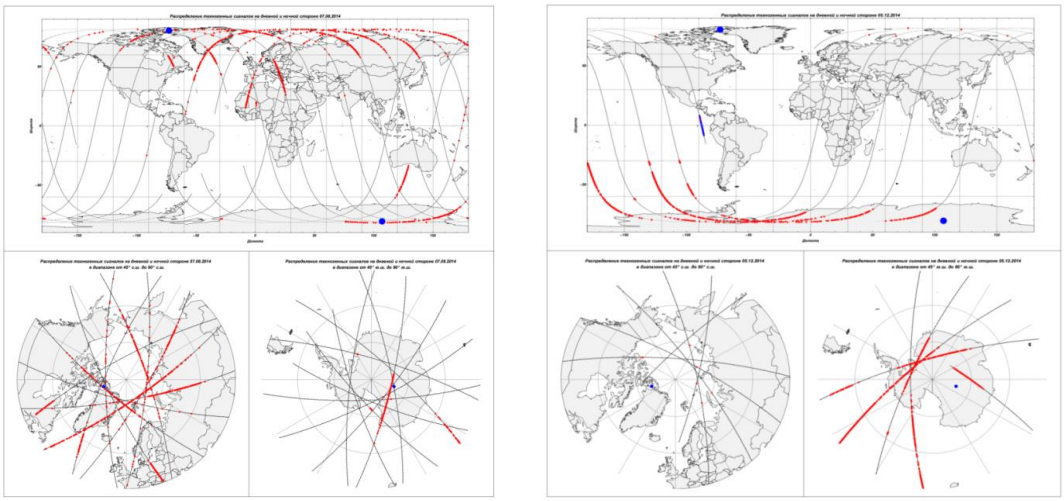


Рис. 2. Карта оптических явлений, зарегистрированных в атмосфере Земли вдоль траектории спутника 2014.08.07 (левый рисунок) и 2014.12.05 (правый рисунок). В верхней части рисунков карта глобального распределения сигналов техногенного свечения. В нижней части рисунков карта азимутального распределения сигналов техногенного свечения в районах Северного и Южного полюсов Земли. Тонкие линии - координаты зарегистрированных шумовых сигналов. Жирные линии - сигналы техногенного свечения на дневных и ночных траекториях орбиты спутника. Пунктирные горизонтальные линии - границы тени восходящих траекторий спутник находится на ночной стороне орбиты, вне этих границ и нисходящие траектории спутник находится на дневной стороне орбиты.

Техногенное свечение наблюдалось и на ночной и на дневной стороне орбиты спутника, причем амплитуда сигналов была пропорциональна освещенности атмосферы. Как показали проведенные расчеты, мощности существующих НЧ – радиостанций недостаточно для возбуждения свечения в ионосфере на площадях,

показанных на географических картах которые, как видно из рисунка, соизмеримы с размерами поверхности Земли. В этом случае для объяснения мощности излучения техногенного свечения ионосферы необходимо предположить, что техногенное свечение либо усиливается за счет дополнительного источника энергии, либо под воздействием радиоволн происходит модуляция существующего естественного фона атмосферы, либо источник находится в непосредственной близости от детектора. Для определения возможного источника энергии этого свечения, требуется математическое моделирование физических процессов в магнитосфере, а также дальнейшие наблюдения со спутников.

Как видно из рис. 2, глобальное распределение техногенного свечения в августе и в декабре существенно отличается. За четыре месяца с августа по ноябрь месяц северные и южные границы географических распределений техногенного свечения на дневной стороне орбиты спутника не зависимо от времени года ежедневно смещались в южном направлении так, что порой достигали зон южнее Экватора. Необходимо отметить, что за отмеченный период не выявлено синхронных геофизических явлений, способствующих усилению влияния НЧ – радиостанций и подобному смещению географического распределения техногенного свечения. Также смещение географического распределения по широте не объясняется полностью сезонными изменениями длительности дня в Северном и Южном полушариях Земли. При этом отметим, что географическое распределение резко изменялось не в районе географических полюсов, где силовые линии магнитного поля Земли пересекаются с ионосферой, а в магнитосфере на границе ночной и дневной стороне орбиты спутника. Что, возможно, вызвано турбулентными явлениями, возникающими под влиянием излучения Солнца на дневной стороне магнитосферы, а также на ее границе между освещенной и находящейся в тени Земли.

На ночной стороне Земли техногенное свечение в основном наблюдается вдоль меридианов, долгота которых проходит вблизи наиболее мощных НЧ - радиостанций, находящиеся в Америке и Австралии. Самой мощной из них является низкочастотная радиостанция NWC (North-West Cape transmitter), излучающая 1 МВт мощности на частоте 19.8 кГц, находящаяся в западной части Австралии, воздействие которой на атмосферу в период наблюдений техногенного свечения на ночной стороне регистрировалось наиболее часто.

Обсуждение

Для объяснения наблюдающегося техногенного свечения необходимо найти причины естественного происхождения, под влиянием которых усиливается воздействие радиоизлучения НЧ-станций настолько, что становится возможным наблюдение сигналов техногенного свечения во всем диапазоне освещенностей атмосферы на дневной и ночной стороне орбиты спутника. На то, что такие причины существуют, указывает смещение и значительные флюктуации северных и южных границ географического распределения техногенного свечения, что является следствием естественных процессов в магнитосфере, а также ее турбулентности, вследствие которой на дневной стороне орбиты спутника возникают зоны со случайными географическими координатами, в которых полностью отсутствует техногенное свечение.

Не исключено также и то, что техногенное свечение возникает вблизи космического аппарата, что не противоречит данным наблюдения, но в этом случае, из-за близкого расположения источника свечения для наблюдения сигнала требуется существенно меньшая интенсивность его свечения, а для возбуждения этого свечения и меньшая мощность НЧ-радиостанций. Для проверки перечисленных предположений с целью выявления геофизических причин возникновения обнаруженных оптических явлений необходимы дополнительные эксперименты на космических аппаратах и математическое моделирование процессов в околоземной плазме, находящейся в магнитном поле, на которую воздействует солнечное излучение и излучение НЧ-радиостанций.

Литература

1. Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В., Баринова В.О., Салеев К.Ю.. Обнаружение глобальных явлений техногенного ультрафиолетового и инфракрасного свечений ночной атмосферы на спутнике «Вернов».ЖЭТФ/JETP. 2016. Т.150, №3, сс.470-479.

2. Гарипов Г.К., М.И. Панасюк, В.И. Тулупов, И.А. Рубинштейн, А.В. Широков, И.В. Яшин и У.И. Салазар, Детектор УФ на борту научно- образовательного микроспутника МГУ Университетский-Татьяна. ПТЭ. 2006. №1, сс. 135–141.

.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 35-38.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.35-38

ПОЯВЛЕНИЕ СУПЕРСУББУРЬ И СУББУРЬ НА ВЫСОКИХ ШИРОТАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

И.В. Дэспирак[1], А.А. Любчич[1], Н.Г. Клейменова[2]

[1]*ФГБНУ "Полярный геофизический институт", Мурманск, Апатиты (e-mail: despirak@gmail.com)*
[2]*Институт Физики Земли РАН, Москва*

Аннотация. На основе данных сети магнитных станций SuperMAG и IMAGE, базы данных OMNI по солнечному ветру и каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра (ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/) проведен сравнительный анализ условий космической погоды для появления магнитных суббурь. Исследовалось три типа суббурь. Первый тип- «расширенные» суббури, которые перемещаются из авроральных (<70º) в полярные (>70º) геомагнитные широты, второй тип- «полярные» суббури, которые наблюдаются только на широтах выше ~70º при отсутствии одновременных геомагнитных возмущений на широтах ниже ~70º. Третий тип – «суперсуббури» (SSS), которые представляют собой особенно интенсивные суббури (SML <-2500 нТл и AE <-2500 нТл). Был проведен сравнительный анализ между разными типами солнечного ветра и появлением этих трех типов суббурь. Мы рассматривали только 6 типов солнечного ветра: высокоскоростные потоки (FAST); межпланетные проявления коронального выброса массы – магнитные облака (MC) или EJECTA; области сжатой плазмы перед этими потоками (CIR и SHEATH); медленный солнечный ветер (SLOW). Всего было отобрано 186 «полярных», 202 «расширенные» и 157 случаев «суперсуббурь». Показано, что появление суперсуббурь связано с межпланетными проявлениями корональных выбросов массы (SHEATH, MC/EJECTA**) (**~96%) и фактически не связано с высокоскоростными потоками из корональных дыр (FAST) (~2%). Однако большинство «расширенных» суббурь (~75%) наблюдаются во время высокоскоростных потоков (FAST) или области сжатия плазмы перед этими потоками (CIR), и лишь ~18% таких суббурь наблюдаются во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы EJECTA и области сжатия перед ними SHEATH. В тоже время ~67% «полярных» суббурь наблюдаются во время медленных потоков солнечного ветра (SLOW), и лишь ~ 19% таких суббурь были зарегистрированы во время SHEATH и EJECTA, и только в том случае, если они происходили на фоне медленного потока солнечного ветра. «Полярные» суббури могут наблюдаться также в начале или в конце высокоскоростного потока FAST, пока скорость солнечного ветра еще не достигла высоких значений или уже понизилась. Таким образом, в разных условиях космической погоды возможно появление разных типов магнитных суббурь на Земле.

Abstract. We considered the solar wind stream types and their possible influence on the appearance of the specific magnetic substorms. The catalog of the large-scale solar wind phenomena (ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/) and OMNI database have been used for determination of the solar wind stream types. We selected substorms by the data of SuperMAG global magnetometers network and meridional chain of IMAGE magnetometers. Three types of substorms have been considered: two types of the substorms observed at the geomagnetic latitudes higher ~ 70° CGC ("polar" and "expanded" substorms) and the supersubstorms (the particularly intense substorms with SML index < -2500 nT). Six types of the solar wind streams have been analyzed: the high speed streams from coronal holes (FAST); the interplanetary manifestations of coronal mass ejections: the magnetic clouds (MC) or EJECTA; the regions of compressed plasma before these streams – CIR and SHEATH; the slow solar wind (SLOW) streams. The 186 "polar", 202 "expanded" and 157 "supersubstorm" (SSS) events have been selected**.** It was found that these different substorm types occur during different solar wind types. It was shown that supersubstorm events were associated with SHEATH, MC, EJECTA and they almost did not observe during FAST and SLOW. The "expanded" substorms were usually registered during FAST and compressed plasma regions (CIR, SHEATH), as well as during EJECTA. The "polar" substorms were observed during SLOW and EJECTA that occur against the background of a slow flow of solar wind, as well as at the end or at the beginning of FAST, when the solar wind speed already decreases or not yet reaches the high values. Thus, the behavior of the ground-based substorms significantly controls by the types of the solar wind streams.

Материалы и методы

Типы солнечного ветра определялись по 1-минутным данным OMNI (https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/) и каталогу крупномасштабных явлений солнечного ветра, который подробно описан в работе [1]. Для анализа мы использовали 6 разных типов солнечного ветра (согласно каталогу ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/) - быстрые (FAST) и медленные (SLOW) потоки из корональных дыр и пояса стримеров, магнитные облака (MC) и

EJECTA, связанные с проявлениями корональных выбросов массы, а также области сжатия плазмы на фронтах быстрых потоков – CIR (перед потоком FAST) и SHEATH (перед магнитным облаком и EJECTA).
Исследование магнитных суббурь проводилось по данным наземных наблюдений на магнитных станциях сети SuperMAG (http://supermag.jhuapl.edu/) и скандинавского профиля IMAGE (http://space.fmi.fi/image/). В настоящем исследовании суперсуббури определялись по значениям SML (<-2500 нТл) и AL индексов геомагнитной активности (<-2500 нТл). За период 1998-2016 г. было найдено 157 случаев суперсуббурь (SSS), из них 131 случай – по сети SuperMAG и 26 случаев – по сети IMAGE. Высокоширотные «полярные» и «расширенные» суббури идентифицировались с помощью меридиональной цепочки TAR –NAL (Tartu (TAR), CGC lat. = 54.47°- Ny Ålesund (NAL), CGC lat. = 75.25°). За 1995-1996 и 1999-2000 годы было найдено 388 случаев наблюдения суббурь на высоких геомагнитных широтах, из них 186 случаев «полярных» суббурь и 202 случая «расширенных» суббурь. Примеры «расширенных» и «полярных» суббурь, а также суперсуббурь (supersubstorms - SSS) подробно описаны в предыдущих работах [2-5].

Результаты и обсуждение

Мы сравнили появление трех типов суббурь – суперсуббурь (SSS), «расширенных» и «полярных» суббурь - с одновременными наблюдениями разных структур и потоков солнечного ветра. Результаты представлены на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 показаны распределения суббурь, наблюдавшихся на высоких геомагнитных широтах (>70º), т.е. «расширенных» и «полярных», по разным типам солнечного ветра. Представлено два распределения числа суббурь во время разных типов солнечного ветра, черным цветом показаны «расширенные» суббури, серым цветом- «полярные» суббури. Видно, что «расширенные» суббури наблюдались, в основном, во время высокоскоростных потоков (FAST). Кроме того, они появлялись и во время проявлений межпланетных выбросов массы (EJECTA). Если учитывать скорость потока, на фоне которого происходило событие, то «расширенные» суббури наблюдались во время EJECTA, происходящих на фоне высокоскоростного потока (EJECTA, FAST). «Расширенные» суббури наблюдались и во время областей сжатия перед потоками, CIR и SHEATH. Довольно мало событий было зарегистрировано во время медленных потоков (SLOW), и также некоторая часть событий наблюдались без определенных потоков солнечного ветра. Противоположно этому «полярные» суббури наблюдались во время медленных потоков солнечного ветра (SLOW), а также в конце или в начале высокоскоростного потока FAST. Но лишь одно событие было в начале потока, остальные 23 события были в конце потока FAST.

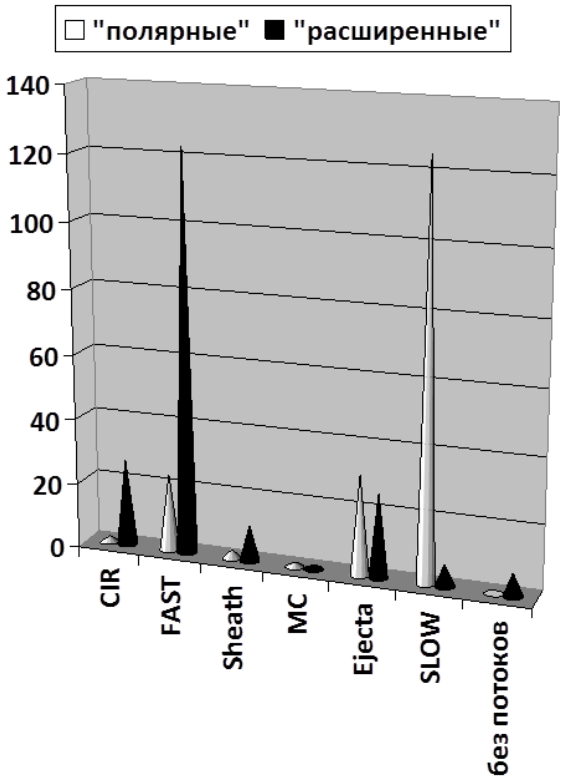


Рисунок 1. Гистограммы распределения высокоширотных суббурь по разным типам солнечного ветра, «полярные» суббури отмечены серым цветом, «расширенные»- черным цветом.

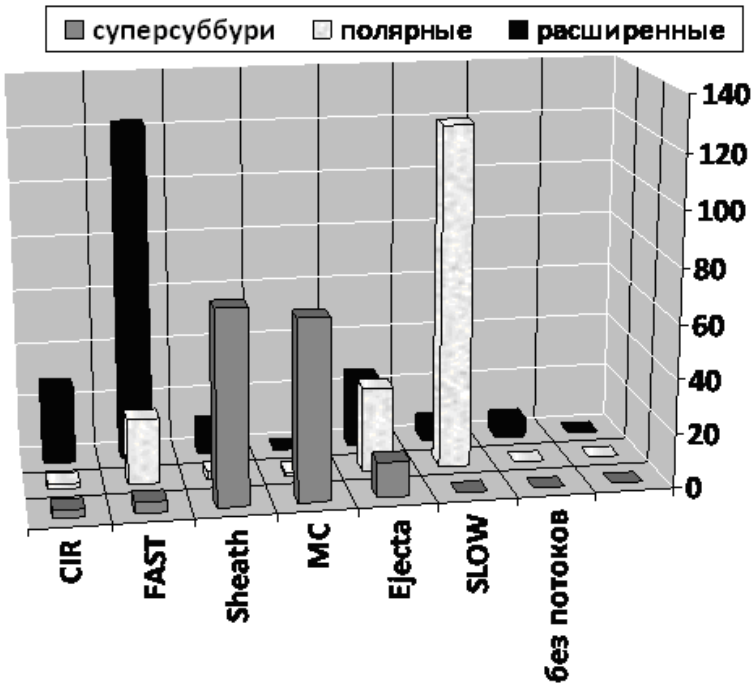


Рисунок 2. Гистограммы распределения суперсуббурь, «расширенных» и «полярных» суббурь по разным типам солнечного ветра, суперсуббури показаны темно-серым цветом, «полярные» суббури –светло-серым цветом, «расширенные» суббури - черным цветом.

«Полярные» суббури были зарегистрированы и во время EJECTA, но с низкой скоростью солнечного ветра (EJECTA, SLOW), в отличие от «расширенных» суббурь, которые наблюдались во время EJECTA с высокой скоростью солнечного ветра (EJECTA, FAST). Кроме того, видно, что «расширенные» и «полярные» суббури фактически не наблюдались во время магнитных облаков (MC).

На рисунке 2 показаны сравнительные гистограммы распределения «полярных» и «расширенных» суббурь и суперсуббурь по различным типам солнечного ветра. Видно, что распределения трех типов суббурь сильно различаются, условия наблюдения «полярных», «расширенных» и суперсуббурь практически противоположны. Так, суперсуббури (SSS) появляются, в основном, во время магнитных облаков MC и областей сжатой плазмы SHEATH. И иногда они появлялись во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы (EJECTA). И очень редко SSS могут появляться во время областей сжатой плазмы перед высокоскоростным потоком (CIR) или во время самого высокоскоростного потока (FAST). Таким образом, мы видим, что появление SSS связано с межпланетными проявлениями корональных выбросов массы и фактически не связано с высокоскоростными потоками из корональных дыр. В то время как «расширенные» суббури, наоборот, чаще всего появляются во время высокоскоростных потоков (FAST), а «полярные» суббури- во время медленных потоков солнечного ветра (SLOW).

В работе получено, что появление разных типов суббурь связано с определенными типами солнечного ветра. Рассматривая влияние разных типов солнечного ветра на суббуревые возмущения, мы фактически рассматриваем влияние различных комбинаций геоэффективных параметров, так как каждый тип солнечного ветра характеризуется определенной комбинацией параметров (например, [6-9]). Так, для высокоскоростных потоков из корональных дыр (FAST) характерны высокие значения скорости солнечного ветра (V> 450 км/с) и температуры, но низкие значения плотности плазмы. Медленные потоки (SLOW) означают низкие значения скорости солнечного ветра (V <450 км/с) и одновременно повышенные значения плотности и низкую температуру плазмы [1].

Надо отметить, что существует довольно много работ, в которых исследовалось поведения электроджетов и полярных сияний на высоких геомагнитных широтах [10-12], рассматривались также и влияния отдельных потоков и структур солнечного ветра на суббуревые возмущения [13-15]. Однако, в отличие от предыдущих работ, в данной работе предпринята попытка систематизации наших знаний, рассматривается влияние, в целом, крупномасштабной структуры солнечного ветра на появление определенного типа суббурь, и при этом сравниваются между собой роли разных типов солнечного ветра.

Заключение

Выполнено сравнение появления трех типов магнитных суббурь с крупномасштабной структурой потоков солнечного ветра. Показано, что в разных условиях космической погоды на земной поверхности наблюдаются разные типы суббурь:
«Расширенные» суббури наблюдаются, в основном, во время высокоскоростных потоков из корональных магнитных дыр (FAST); иногда во время областей сжатой плазмы (CIR, SHEATH) перед высокоскоростным потоком (FAST) и перед MC/EJECTA, а также во время межпланетных проявлений выбросов корональной массы (EJECTA), которые наблюдаются на фоне быстрого потока (EJECTA, FAST).
«Полярные» суббури наблюдаются, в основном, в течение медленных потоков (SLOW) и выбросов межпланетной корональной массы (EJECTA), которые происходят на фоне медленного потока солнечного ветра (EJECTA, SLOW), а также в конце или в начале высокоскоростного потока (FAST), когда скорость солнечного ветра уже уменьшилась или еще не достигла высоких значений.
“Суперсуббури” (SSS) наблюдаются во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы, а именно в периоды SHEATH, MC и EJECTA и фактически не наблюдаются во время высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр (CIR, FAST).

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 28 «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

Литература

1. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976-2000 гг. // Космические Исследования. Т. 47. № 2. С. 99-113. 2009.
2. Клейменова Н.Г., Антонова Е.Е., Козырева О.В., Малышева Л.М., Корнилова Т.А., Корнилов И.А. Волновая структура магнитных суббурь в полярных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. №6. С. 785-793. 2012.
3. Дэспирак И.В., Любчич А.А., Клейменова Н.Г. «Полярные» и «высокоширотные» суббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. №5. С. 619-626. 2014.
4. Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G. High-latitude substorm dependence on space weather conditions in solar cycle 23 and 24 (SC23 and SC24) // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 177. №2. P. 54-62. doi: 10.1016/j.jastp.2017.09.011, 2018.
5. Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. Extremely intense (SML≤ −2500 nT) substorms: isolated events that are externally triggered? // Ann. Geophys. V. 33. №5. P. 519–524. 2015.
6. Burlaga L.F., Klein L., Sheeley N.R., Jr., Michels D.J., Howard R.A., Koomen M.J., Schwenn R., Rosenbauer H. A magnetic cloud and a coronal mass ejection // Geophys. Res. Lett. V. 9. P. 1317-1320. 1982.
7. Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream // Solar Physics. V. 29. №2. P. 505-525. 1973.
8. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review // J. Geophys. Res. V. 111, №A7. A07S01 doi:10.1029/2005JA011273. 2006.
9. Mitsakou E., Moussas X. Statistical study of ICMEs and their sheaths during solar cycle 23 (1996-2008) // Solar Phys. V. 289. P. 3137-3157. doi:10.1007/s11207-014-0505-y. 2014.
10. Gussenhoven M.S. Extremely high latitude auroras // J. Geophys. Res. V. 87. P. 2401–2412. 1982.
11. Mende S.B., Frey H.U., Geller S.P., Doolittle J.H. Multistation observations of auroras: Polar cap substorms // J. Geophys. Res.V. 104. №8. P. 2333–2342. 1999.
12. Дэспирак И.В., Любчич А.А., Бирнат Х.К., Яхнин А.Г. Полярная экспансия суббуревого западного электроджета в зависимости от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 3. С. 297-305. 2008.
13. Сергеев В.А., Яхнин А.Г., Дмитриева Н.П. Суббури в полярной шапке - эффект высокоскоростных потоков солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т.19. №6. С. 1121-1122. 1979.
14. Despirak I.V., Lubchich A.A., Yahnin A.G., Kozelov B.V., Biernat H.K. Development of substorm bulges during different solar wind structures // Ann. Geophys. V. 27. №5 P. 1951–1960. 2009.
15. Liou K., Sotirelis T., Richardson I. Substorm occurrence and intensity associated with three types of solar wind structure // J. Geophys. Res. V.123, №1. P. 485–496. doi:10.1002/2017JA02445. 2018.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 39-42.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.39-42

СУББУРЕВАЯ АКТИВНОСТЬ 24 ДЕКАБРЯ 2014 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ THEMIS И КАМЕРАМ MAIN В АПАТИТАХ

И.В. Дэспирак[1], Т.В. Козелова[1], Б.В. Козелов[1], А.А. Любчич[1]

[1]*ФГБНУ "Полярный геофизический институт", Мурманск, Апатиты (e-mail: despirak@gmail.com)*

Аннотация. Рассмотрен случай одновременных наблюдений суббуревой активности по данным двух спутников THEMIS (THD и THE) в полуночной магнитосфере на r ~ 8.5- 10.3 Re, и наземным наблюдениям 24 декабря 2014 г. в интервале с ~16 до ~17:30 UT. В этот период суббуревые возмущения были зарегистрированы на спутниках и в наземных данных: по наблюдениям сияний на камерах MAIN (Апатиты), магнитным возмущениям на станциях Тикси (TIK), Диксон (DIX), Амдерма (AMD), Ловозеро (LOZ), сети магнитометров IMAGE, а также магнитным пульсациям типа *Pi* 1B (Ловозеро). Магнитная активность началась на станции Диксон (DIX) в T_0~16:10 UT, после T_1 ~ 16:35 UT западный электроджет ослабевает на восточных станциях TIK и DIK, а на западных станциях, начиная от Амдермы (AMD), возрастает. Далее электроджет распространялся на запад, к Ловозеро, где в T_2~16:45 UT наблюдались пульсации типа *Pi* 1B. Показано, что фронты диполизации и инжекции энергичных электронов в магнитосфере наблюдались вблизи моментов внезапного усиления активности сияний (уярчения авроральных дуг, брейкапа сияний и появления изгиба полярных сияний (WTS)). Разные знаки E_X компонент электрического поля на двух ИСЗ в начальный период около T_1 наводят на мысль, что активная дуга, связанная с *''onset''*, располагалась между THD и THE. Почти одновременное начало роста магнитного поля и потоков плазмы на обоих ИСЗ и опережение начала роста на более восточном ИСЗ (THE) подтверждает азимутальное распространение возмущения на запад. Дискретная локализованная по широте расширяющаяся на запад авроральная дуга типа аврорального 'horn', которая появлялась над Апатитами (APT) примерно на 2 MLT к западу от области "onset" суббури, поддерживает такое представление. Наблюдаемые на магнитометрах характерные вариации D- компоненты магнитного поля, их повторяемость на разных долготах при распространении WTS на запад свидетельствуют в пользу пространственного представления о вытекающем из ионосферы продольном токе, который расположен на западном краю активной области сияний.

Материалы и методы

В работе использовались наземные оптические наблюдения сияний на камерах MAIN в Апатитах (APT) (67°34N 33°24E), магнитные возмущения на станциях Диксон (DIX), Тикси (TIK), Амдерма (AMD), Ловозеро (LOZ) и сети IMAGE, а также рассмотрены вариации полей и потоков частиц на двух спутниках THE и THD.

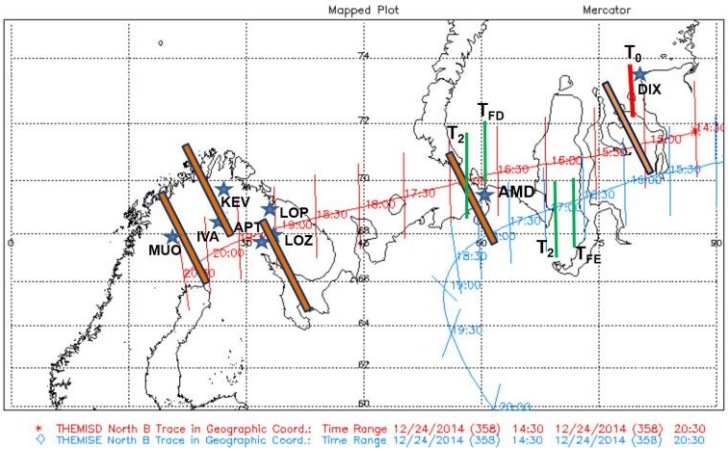


Рисунок 1. Проекции орбит THD (красный цвет) и THE (голубой цвет) на карту с обозначениями наземных магнитных станций в интервале 14:30 -20:50 UT 24 декабря 2014г. T_0 - начало возмущения (красная полоска). Наклонными полосами показано расширение суббури на запад, вертикальными зелеными линиями T_{FD} и T_{FE} - моменты начала быстрых потоков плазмы на спутниках; T_2 - начало взрывной фазы суббури.

Результаты и обсуждение

1. Развитие суббури по наземным данным

Суббуревые автивизации разной интенсивности были зарегистрированы в интервале [16:00-17:30] UT 24 декабря 2014 г., когда глобальная возмущённость была K_P=3. Для анализа этих активизаций использовались наземные и спутниковые данные. Координаты наземных станций и проекции спутников THD и THE показаны на Рис.1.

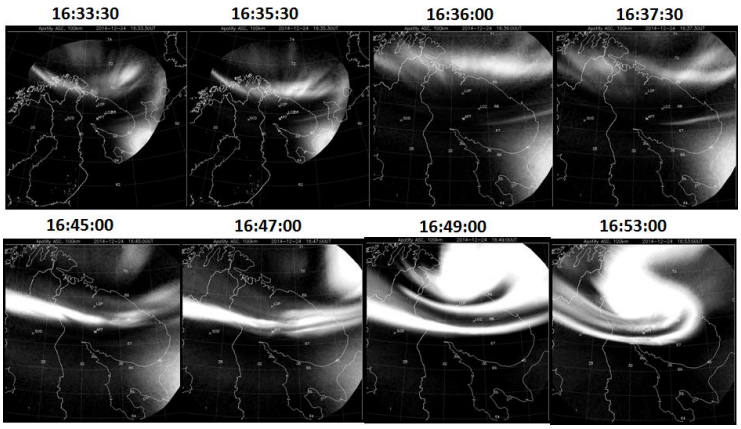


Рисунок 2. Проекции полярных сияний на высоту 100 км, зарегистрированные камерой всего неба в Апатитах

На Рис. 2 показана авроральная активность по данным камеры всего неба на станции Апатиты в интервале [16:33-16:53] UT 24 декабря 2014 г.. Развитие магнитных возмущений по наземным данным от долготы Тикси (TIK) на запад до Andoya (AND) показано на нижних панелях в двух колонках на Рис. 3. Сначала наблюдалась короткая локализованная бухта ΔH <0 на станции Диксон (DIK) (левая колонка), сопровождаемая риометрическим поглощением, появляющимся в подготовительную фазу суббури [1].

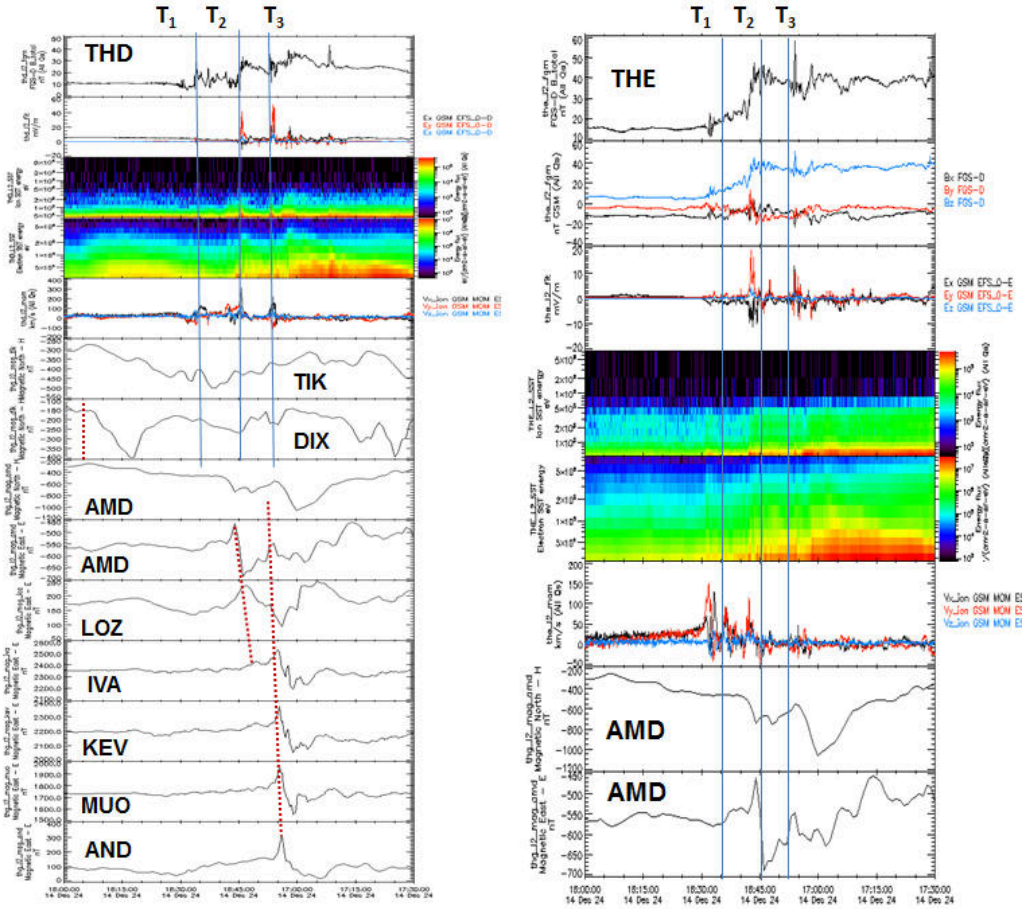


Рисунок 3. Слева данные приборов спутника THD + магнитометры; справа данные приборов спутника THE +магнитометр AMD. Вертикальными линиями отмечены моменты T_1 T_2, T_3 по спутниковым данным (сплошные линии) и магнитометрам (пунктирные линии)

Затем после ~ (16:30 – 16:35) UT до ~17:10 UT западный электроджет (ΔH <0) на западных станциях, начиная от Амдермы (AMD), возрастает. Плавное начало усиления электроджета на AMD можно выделить по небольшому возрастанию в D-компоненте (ΔD >0) около момента T_1 ~ (16:35-16:37) UT [2]. В это время в Ловозеро (LOZ) регистрируется слабый всплеск магнитных пульсаций типа *Pi* 1B (τ= 0.2-15 сек) [3], а данные камеры всего неба на станции Апатиты (APT) показывают появление слабой узкой авроральной дуги к югу от LOZ вдоль широты φ~67.5°, которую можно интерпретировать как предвестник суббури или псевдобрейкап, происходящий к востоку от LOZ (вблизи AMD, как будет видно далее).
В момент T_2 ~ (16:43-16:45) UT появилась новая очень яркая дуга к северу от LOZ вдоль широты φ ~68.5° (начало брейкапа), авроральная активность быстро распространяется вдоль полосы ярких сияний с востока на запад. В момент T_3 ~ (16:52-16:53) UT западный край движущегося на запад изгиба полярных сияний (WTS) проходит мимо меридиана LOZ (см. Рис.2). В эти моменты T_2 и T_3 наблюдаются, соответственно, начало и максимум интенсивных всплесков пульсаций Pi 1B (не показаны), которые, как известно, связаны с взрывной фазой суббури и коррелируют с высыпаниями электронов [4]. Авторы работы [5] яркую дугу перед WTS назвали “auroral horn” и показали, что эта дуга, а также WTS и новые яркие дуги, появляющиеся около приполюсной границы авроральной выпуклости, связаны с более энергичными электронами, чем обычные дуги и диффузные сияния.
В работах [6-10] было показано, что к западу (востоку) от западного края WTS, с которым связан вытекающий из ионосферы продольный (вдоль магнитных силовых линий) ток, на Земле регистрируется возрастание (уменьшение) азимутальной D- компоненты магнитного поля. На нижних панелях на Рис. 3 видны именно такие вариации магнитного поля на разнесённых по долготе станциях от AMD до AND, из которых следует, что вытекающий из ионосферы продольный ток распространяется от AMD (области начала суббури) на запад в согласии с динамикой полярных сияний в виде WTS во время взрывной фазы суббури. На Рис.3 моменты T_1 – T_3 отмечены вертикальными линиями. Заметим, что на верхних панелях двух вытянутых колонок (левой и правой) этого рисунка представлены данные измерений магнитного и электрического полей, потоки энергичных ионов и электронов (SST датчик) и три компоненты скорости течения ионов на двух спутниках THD (слева) и THE (справа). Из рисунка видно, что первые вариации в магнитосфере вблизи меридиана AMD обнаруживаются до начала псевдобрейкапа в момент T_1. Далее подробнее рассматриваем поведение полей и потоков частиц на двух спутниках THD и THE.

2. Развитие возмущений по спутниковым данным

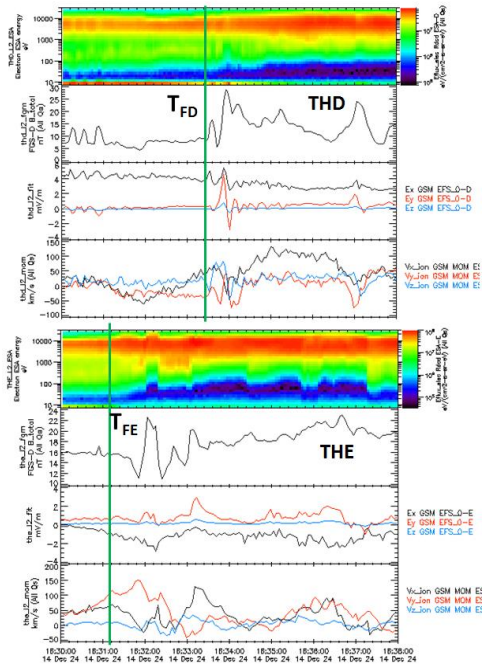


Рисунок 4. Вариации потоков энергичных электронов, величины магнитного поля и компонент электрического поля и скорости плазмы с 16:30 до 16:38 UT для THD (вверху) и THE (внизу).

Рис. 4 представляет данные ИСЗ в начальный период возмущения в интервале [16:30-16:38] UT 24 декабря 2014 г. На THD (верхние панели) выделяем момент T_{FD} = 16:33:24 UT для обозначения начала течения (flow) плазмы на THD и вариаций E- и B- полей. На спутнике THE (нижние панели) локальная диполизация магнитного поля, пульсации с периодом ~ 30 сек в магнитном и электрическом полях и локализованные возрастания потоков электронов начались раньше, чем на THD, в T_{FE} = 16:31:12 UT. На этом спутнике первым наблюдался рост азимутальной компоненты скорости в западном направлении до V_Y~ 150 км/с.

Сравнение измерений полей на двух спутниках приводит к выводам. (1) Разные знаки E_X компонент электрического поля на двух ИСЗ в начальный период свидетельствуют о том, что активная дуга, связанная с источником возмущения, располагалась по широте между THD и THE. (2) Почти одновременное начало роста магнитного поля и потоков плазмы на обоих ИСЗ и опережение начала роста на более восточном ИСЗ (THE) подтверждает азимутальное распространение возмущения от области начала возмущения на запад.
Вариации потоков частиц в магнитосфере на r ~8.5–10.3 R_E во время взрывной фазы суббури показаны на Рис.3 на верхних панелях двух вытянутых колонок (слева - для THD и справа – для THE). Из этого рисунка видно, что фронты диполизации и связанные с ними волновая активность, увеличение потока энергичных электронов и всплеск азимутальной компоненты электрического поля в магнитосфере наблюдались вблизи моментов усиления активности сияний и характерных особенностей вариаций магнитного поля на разных долготах по мере распространения изгиба на запад.

Заключение

Анализ суббуревой активности по спутниковым на r~8.5–10.3 R_E и наземным данным привёл к следующим результатам.
(1) Почти одновременное начало роста магнитного поля и потоков плазмы на обоих ИСЗ и опережение начала роста на более восточном ИСЗ подтверждает азимутальное распространение возмущения от области начала возмущения на запад.
(2) Фронты диполизации и инжекции энергичных электронов в магнитосфере наблюдались вблизи моментов внезапного усиления активности сияний (уярчения авроральных дуг, брейкапа сияний и появления WTS).
(3) Характерные особенности вариаций магнитного поля и их повторяемость на разных долготах по мере распространения изгиба на запад позволяют перейти к пространственному представлению, связанному с вытекающим из ионосферы продольным током, расположенным в западном крае активной области.
Поведение полей и частиц в полуночной магнитосфере, полученное по данным THEMIS на r~8.5–10.3 R_E, согласуется с результатами работы [10], в которой использовались данные GOES-2 (на 6.6 R_E) при прохождении WTS через меридиан спутника и было получено, что к востоку от WTS наблюдается активная область, где наблюдается диполизация и инжекция энергичных электронов.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН №28 «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

Литература

1. Ranta, H., Ranta A., Collis P.N, Hargreaves J.K. Development of the auroral absorption substorm; studies of pre-onset phase and sharp onset using an extensive riometer network // Planet. Space Sci., V.29, №12, p. 1287-1313, 1981.
2. Kisabeth J.L., Rostoker G. Current flow in auroral loops and surges inferred from ground-based magnetic observations // J. Geophys. Res., V. 78, №25, p. 5573-5584, 1973.
3. Гульельми А.В, Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы, М., "Наука", 1973.
4. Kawasaki K., Rostoker G. Auroral motions and magnetic variations associated with the onset of auroral substorms // J. Geophys Res., V 84, A12, p. 7113-7122, 1979.
5. Yahnin A.G., Sergeev V.A., Pellinen R.J., Baumjohann W., Kaila K.U, Ranta H., Kangas J, Raspopov O.M. Substorm time sequence and microstructure on 11 November 1976 // J. Geophys., V. 53, №3, p.182-197, 1983.
6. Tighe W.G., Rostoker G., Characteristics of westward traveling surge during magnetospheric substorms // J. Geophys., V. 50, №1, p. 51-67. 1981.
7. Inhester B., Baumjohann W., Greenwald R.A., Nielsen E. Joint two-dimensional observations of ground magnetic and ionospheric electric field associated with auroral zone currents, 3, Auroral zone currents during the passage of a westward traveling surge // J. Geophys. V. 49, №3, p. 155-162, 1981.
8. Козелова Т.В., Пудовкин М.И., Лазутин Л.Л., Педерсен А., Глассмайер К. Поведение электрического поля в магнитосфере на 6,6 RE в активной области во время суббури // Геомагнетизм и аэрономия, V.26, №4, стр. 621-627, 1986.
9. Петров В.Г., Козелова Т.В., Лазутин Л.Л., Трейю Ж.-П. Распределение электрического поля около распространяющегося на запад изгиба полярных сияний // Геомагнетизм и аэрономия, V.24, №2, стр. 232-236, 1984.
10. Kozelova, T.V., Kozelov B.V., Lazutin L.L. Local gradient of energetic ion flux during dipolarization on 6-7 RE // Advances in Space Res., V. 33, №5, p. 774 -779, 2004.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 43-46.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.43-46

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА НА ЯМАЛЕ

А.Н.Зайцев, К.Х.Канониди, В.Г.Петров

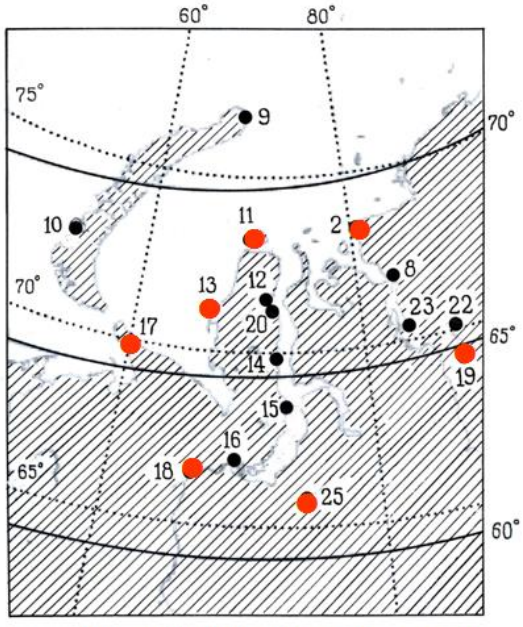
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, г. Москва-Троицк.

Аннотация. Геофизический полигон на Ямале активно развивается как комплекс различных систем наблюдений – магнитометры, автоматические метеостанции, пункты изучения мерзлоты, приборы инженерной сейсмологии, приборы экологического контроля. Информация о состоянии магнитное поле Земли и ближнего космоса над Ямалом востребована как для науки, так и для практики. Показано, что оперативные данные о магнитных возмущениях служит основой прогнозов космической погоды. В перспективе запрос на результаты научных исследований будет увеличиваться, особенно при внедрении новых технологий геофизической разведки. Основой развития проекта «Полярная геофизика Ямала» служит сеть магнитометров, сформированная в виде виртуальной системы контроля в реальном времени.

Abstract. The Geophysical polygon on the Yamal Peninsula is actively developing as a complex of various observing systems – magnetometers, automatic weather stations, control points of permafrost, engineering seismology, devices of ecological control etc. Information about the state of the magnetic field of the Earth and near space over Yamal is in demand for both science and practice. It is shown that the operational data on magnetic disturbances serves as the basis for space weather forecasts. In the future, the demand for research results will increase, especially with the introduction of new technologies of geophysical exploration. The basis for future development of the "Polar Geophysics of Yamal" is a network of magnetometers in the form of a virtual real-time monitoring system.

Введение

Начиная с 2009 года на Ямале ведется работа по восстановлению сети геофизических наблюдений служившей основой проекта «Геомагнитный меридиан 145» (1972 - 1998) [1], который сегодня известен под названием «Проект «Полярная геофизика Ямала» [2]. В апреле 2014 года в Салехарде была проведена конференция «Полярная геофизика Ямала: наблюдения, базы данных и информационные системы в практике освоения месторождений нефти и газа – ПОЛАР – 2014», см. http://polar2014.yanao.ru, на которой была выработана стратегия развития полярной гелиогеофизики на ближайшие годы. На рис. 1 представлена карта-схема сети магнитометров в районе Карского моря и полуострова Ямал, работавшая с 1972 года. Часть станций была переведена с аналоговой регистрации на цифровую начиная с 1985 года, и цифровые данные за прошлые годы доступны по сети www.cosmos.ru/magbase. На начало 2018 года продолжается развитие проекта с участием ведущих геофизических институтов России. Красным цветом выделены станции, действующие в настоящее время. Итого сеть магнитометров включает 7 пунктов, из которых пункты 2 и 17 – обсерватории ААНИИ, пункт 19 – обсерватория ИСЗФ, пункты 11, 13, 18, 25 работают в реальном времени, при этом данные доступны на сайте ИЗМИРАН http://geodata.izmiran.ru/. Кроме магнитометров на Ямале ведутся работы по установке других геофизических приборов: автоматических метеостанции по заказу Роснефти, пункты изучения мерзлоты при участии Института мезлотоведения СО РАН, приборы инженерной сейсмологии от Геофизической службы РАН, ионосферная станция Гидрометслужбы в Салехарде, приборы экологического контроля при местных организациях. В Салехарде также работает станция котроля озонового слоя, а в Сеяхе (пункт 14) работает приемник мониторинга сигналов ГЛОНАСС. Координацию работ на местном уровне осуществляет ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» http://www.arctic89.ru/, который обеспечивает поддержку научной, научно-технической и инновационной деятельности на Ямале. В 2015 году запущен проект по созданию виртуальной геофизической лаборатории



Геофизический полигон на Ямале

http://ямалгео.рф/., в том числе для разработки методики регионального прогноза космической погоды с участием ИКИ и ИЗМИРАН. Начало работ было положено в ИЗМИРАН [3] и сформулировано в виде технического решения – справочной системы – дисплея для контроля космической погоды и обстановки в космическом пространстве по интернет ресурсам в реальном времени [4]. Учитывая интерес компании Ямал-СПГ к расширению работ на Ямале можно ожидать что будет построена базовая магнитная обсерваторию в пос. Сабетта. Проект обсерватории представлен фирмой Schlumberger по образцу обсерватории на Аляске (Dead Horse).

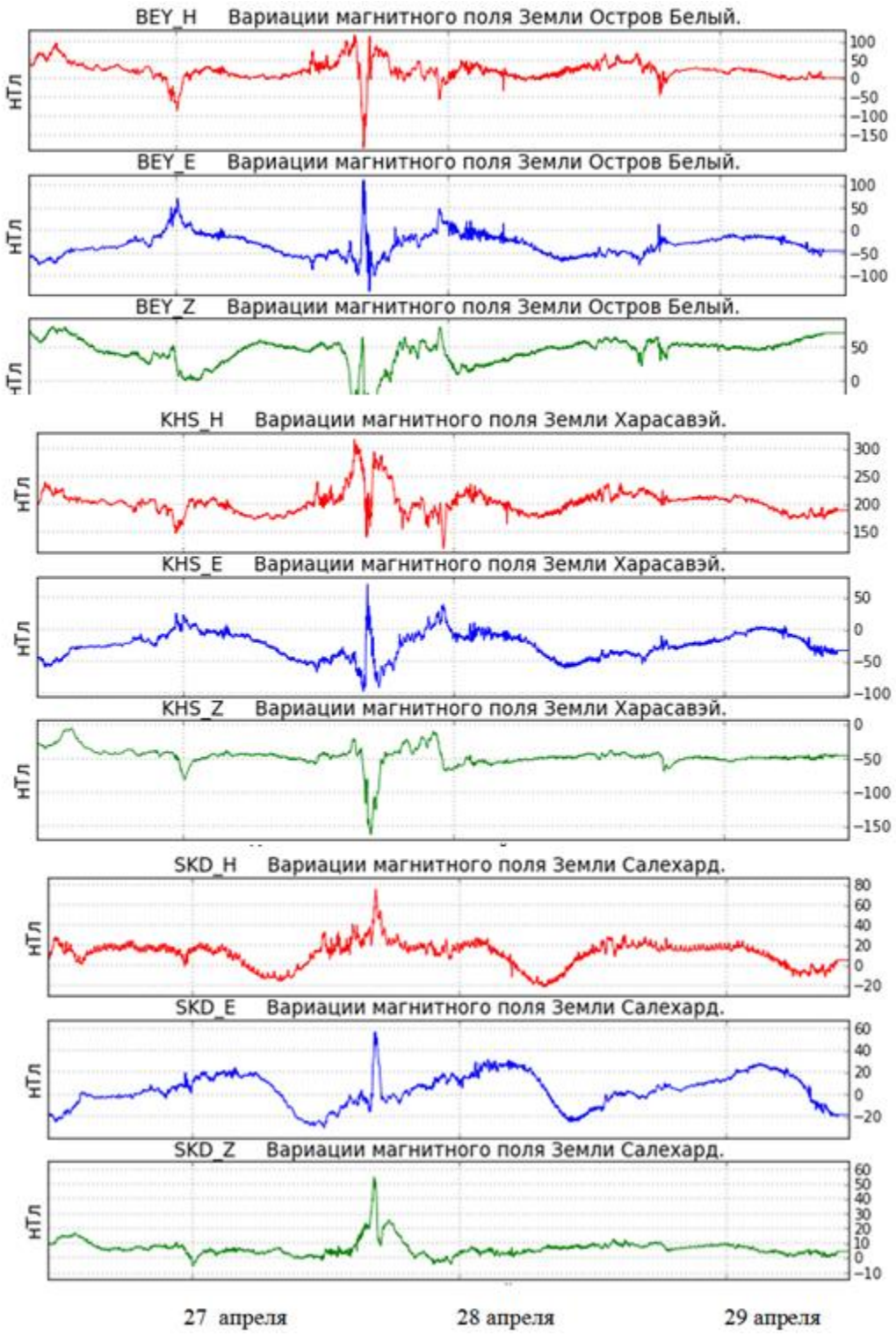
Результаты и обсуждение

Главным направлением проекта «Полярная геофизика Ямала» является создание магнитометрического полигона как основы региональной системы контроля состояния магнитного поля Земли [2]. Известно, что зона полярных сияний представляет собой область активного влияния солнечного ветра на околоземное космическое пространство. Полярные магнитные бури (авроральные суббури) вызваны сильными токами на высотах слоя Е ионосферы на высоте в 100-120 км и достигают силы в несколько миллионов ампер. Эффект таких токов проявляется в виде мощных индукционных токов в газопроводах и энергетических сетях, заметно наличие помех при точной GPS навигации, возникают существенные ошибки при наклонном бурении, при постановке многих электромагнитных методов геофизической разведки. Отсюда возникает проблема точного описания состояния магнитного поля в виде открытой справочно-информационной системы в реальном времени, СИС «Полярная геофизика Ямала», используемой как для научных изысканий, так и для практических работ. В настоящее время начата разработка виртуальной геофизической лаборатории http://ямалгео.рф/. Ввиду того, что регион Ямала представляет собой стратегический ресурс России на ближайшие несколько десятилетий, представляется особо важным учитывать эффекты космической погоды именно в этом регионе, так как здесь имеются особые геофизические условия. Именно поэтому назрела необходимость создания открытой справочно-информационной системы «Полярная геофизика Ямала» как инструмента контроля возможных рисков под воздействием космической погоды [2].

Плотные сети магнитометров являются наиболее простым, надежным и информативным способом исследований пространственно-временных характеристик ионосферных токов. В Арктике сложилось несколько полигонов, где расставлено большое количество магнитометров. В Скандинавии их число достигает более 40, причем значительная часть данных доступна в реальном времени по сети интернет на сервере в Финляндии http://space.fmi.fi/image/www/index.php. Особо следует отметить систему оценки состояния магнитного поля по территории Скандинавии для корректировки показаний магнитометров при наклоном бурении, так называемый «Трекер авроральной электроструи», http://fox.phys.uit.no/AFFECTS/., созданную в обсерватории Тромсе в Норвегии. Создаваемая СИС «Полярная геофизика Ямала» также может иметь функцию трекера авроральных токов по территории Ямала. Кроме систем сбора магнитных данных работают система контроля ионосферы с помошью радаров SuperDARN http://superdarn.jhuapl.edu. В России в ИСЗФ СО РАН начата работа по созданию сети радаров формата SuperDARN. Один из радаров установлен в обсерватории Арти на Урале и покрывает территорию Ямала. Из всех геофизических данных большим спросом пользуются данные о наличии полярных сияний. Имеется несколько систем новокастинга полярных сияний, прогноз сияний по Ямалу имеется на сайте Университета на Шпицбергене (http://kho.unis.no).

Для региональной СИС «Полярная геофизика Ямала» критически важным является задача сбора и представления данных в реальном времени, так как именно данные в реальном времени будут востребованы конечными пользователями. При этом ожидается реальный экономический эффект так как благодаря СИС «Полярная геофизика Ямала» обеспечивается контроль и представление данных о состоянии магнитного поля, ионосферы и полярных сияний по территории Ямала, что позволяет снизить риски под воздействием космической погоды. Развитие сети геофизических наблюдений на Ямале с целью мониторинга состояния околоземного космического пространства в высоких широтах служит основой успешной реализации будущих космических проектов, программ научных исследований и практического использования в газовой и нефтяной индустрии. Наука на Ямале ориентирована на решение прикладных задач, связанных с промышленным освоением региона, изучением влияния экологических факторов на здоровье населения, развитием агропромышленного комплекса. Очевидно, что магнитометрический полигон на Ямале может служить основой системы контроля состояния магнитного поля Земли, которая востребована при всех геофизических и смежных наблюдениях окружающей среды.

Ниже представлен пример регистрации вариаций МПЗ на Ямале.



Пример записей вариаций магнитного поля с 26 по 29 апреля 2018 года по станциям – о.Белый (ш 73.30, д 70.00) , Харасовэй (ш 71.13, д 66.83), Салехард (ш. 66.53, д 66.53). Станции находятся в зоне полярных сияний, расстояние Белый – Харасовэй около 250 км, Харасовэй – Салехард около 500 км. Магнитометр на о.Белый находится на одной геомагнитной широте 67 градусов с магнитной обсерваторией о.Диксон. Данные поступают в реальном времени и после первичной перепаковки выставляются на сайте http://geodata.izmiran.ru/. Во время суббури в 18:00 UT 27 апреля 2018 года магнитометры зафиксировали особое событие - наложение восточной и западной электроструй характерное при развитии «разрыва Харанга».

Заключение

Дальнейшие работы по восстановлению магнитометрический сети на Ямале должны строиться в рамках программ научных исследований выполняемых ИКИ, ИЗМИРАН и других центральных институтов, а также быть поддержаны заинтересованными компаниями на Ямале. Из карты-схемы на рис. 1 следует, что в первую очередь необходимо восстановить магнитно-вариационные наблюдения в пунктах Сабетта (20), Сеяха (14), Мыс каменный (15). Важным дополнением может стать пункт Малые Кармакулы (10) на Новой Земле, который позволяет соединить полигон на Ямале с полигоном в Скандинавии. По мере освоения Ямала возникает возможность установки магнитометров в других пунктах, где планируется развернуть научные стационары по комплексу геофизических и экологических наблюдений.

Из представленных данных следует, что проект «Полярная геофизика Ямала» позволит продвинуться в нескольких направлениях.

1. Научно-исследовательская работа в институтах РАН по исследованию физических явлений в системе солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера – атмосфера на основе спутниковых и наземных данных.
2. Прикладные исследования эффектов воздействия космической погоды на технологические системы, включая предупреждение рисков от воздействия индукционных эффектов.
3. Разработка открытой справочно-информационная система (СИС), охватывающей территорию Ямала, и работающую в реальном времени с представлением вариаций магнитного поля Земли (МПЗ).
4. Эколого-медицинское направление в части исследований влияния магнитных бурь на человека в условиях Севера на основе контроля в реальном времени МПЗ как эффекта воздействия.
5. Образование и просвещение (Public Outreach and Education), для чего информация о состоянии МПЗ передается жителям Ямала через СМИ. При этом ведется разработка программ дополнительного образования в школах Ямала с опорой на данные магнитометров на Ямале и сайтов по космической погоде.

В заключение следует подчеркнуть, что традиционные наблюдения за возмущениями магнитного поля Земли остаются важной составной частью новых проектов по разработке и совершенствованию программ геофизических и космических исследований. Ввиду того, что инфраструктура на Ямале позволяет организовать размещение и доступ по всей его территории, постановка новых экспериментальных программ исследований обречена на успех и в ближайшие годы Ямал будет ведущим центром в научных и прикладных исследованиях.

Благодарности

Работа по проекту «Полярная геофизика Ямала» была поддержена Администрацией ЯНАО, компаниями ООО «Газпром-добыча-Надым», ООО «Газпром-добыча-Ямбург» подписанием в 2009 году Протокола о намерениях с участием ИЗМРИРАН, за что участники проекта выражают искреннюю признательность и благодарность. Со стороны Департамента международных и внешнеэкономических связей ЯНАО (директор А.В.Мажаров), Департамента по науке и инновациям ЯНАО (директор А.Л.Титовский), и Научного центра изучения Арктики ЯНАО (директор А.И. Синицкий) было оказано широкое содействие работам по установке магнитометров, за что все участники проекта от Академии наук выражают благодарность.

Отдельно наши благодарности коллегам из ИКИ РАН, ИЗМИРАН, ААНИИ, ИПГ, ПГИ, НИИЯФ МГУ, ГЦ РАН за постоянное внимание и поддержку проекта «Полярная геофизика Ямала».

Литература

1. Зайцев А.Н. Проект "Геомагнитный меридиан". - Вестник АН СССР, 1974, N 4, с.92-94.
2. Салихов З.С., А.К. Арабский, В.Д.Кузнецов, А.Н. Зайцев, В.Г. Петров, В.В.Фомичев, О.А. Трошичев, А.С. Янжура, Система контроля космической погоды для оценки технологических рисков на территории полуострова Ямал, журнал «Наука и техника в газовой промышленности», № 4, стр. 39-47, 2010.
3. Зайцев А.Н., В.Г.Петров, В.И.Одинцов, А.С.Амиантов, В.А.Шилимов, Виртуальная магнитная обсерватория в зоне полярных сияний на полуострове Ямал, в сб. Инновационные электромагнитные методы геофизики, под ред. акад. Е.П.Велихова, стр. 219-239, Москва, изд-во Научный Мир, 2012
4. Канониди Л.Х., Зайцев А.Н., В.Г.Петров, А.А.Гидеон, С.В.Абрагимов, Информационная лента (дисплей) по космической погоде, в сб. Практические аспекты Гелиогеофизики, ИКИ, М..2016, стр. 33 - 44

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 47-50.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.47-50

ПОЛОСЫ ВТОРОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ И НА ВЫСОТАХ СВЕЧЕНИЯ СПРАЙТОВ

А.С. Кириллов

Полярный Геофизический Институт, Мурманск, Апатиты (e-mail: kirillov@pgia.ru)

Аннотация. Полосы второй положительной системы молекулярного азота N_2 являются характерными эмиссиями в полярной ионосфере и на высотах свечения спрайтов. С понижением высоты усиливается роль столкновительных процессов в кинетике электронно-возбужденных молекул $N_2(C^3\Pi_u)$. В настоящей работе особое внимание уделено кинетике гашения электронного состояния $C^3\Pi_u$ при столкновениях с молекулами N_2 и O_2. Впервые показано, что межмолекулярные процессы являются доминирующими в процессах релаксации энергии возбуждения состояния $C^3\Pi_u$ при молекулярных столкновениях. Проведенное моделирование колебательной населенности состояния $C^3\Pi_u$ на различных высотах атмосферы Земли включает особенности переноса энергии возбуждения при молекулярных столкновениях. Показано, что учет столкновительных процессов очень важен при исследованиях кинетики молекулы $N_2(C^3\Pi_u)$ и свечения полос второй положительной системы молекулярного азота на различных высотах атмосферы Земли.

Abstract. The bands of second positive system of molecular nitrogen N_2 are characteristic emissions in polar ionosphere and at the altitudes of sprites. The role of collisional processes in the kinetics of electronically excited molecules $N_2(C^3\Pi_u)$ increases with the decrease of heights. Here special attention is paid to quenching kinetics of the $C^3\Pi_u$ electronic state by molecular collisions. The simulation of vibrational population of the $C^3\Pi_u$ state at different altitudes of the Earth's atmosphere includes the features of excitation energy transfers during molecular collisions. It is shown that the inclusion of collisional processes is very important in studies of the kinetics of the $N_2(C^3\Pi_u)$ molecules and of the emission of bands of the second positive system of molecular nitrogen at different altitudes of the Earth's atmosphere.

Введение

Свечение полос второй положительной системы (2PG) молекулярного азота N_2 происходит при спонтанном электронном переходе

$$N_2(C^3\Pi_u,v) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g,v') + hv_{2PG} \quad . \qquad (1)$$

Полосы 2PG системы являются характерными эмиссиями в полярной ионосфере при вторжении в атмосферу высокоэнергичных авроральных частиц. В работе [Кириллов и др., 1987] были приведены высотные профили интегральных интенсивностей свечения полос первой отрицательной системы (1NG, 391.4 нм) иона молекулярного азота N_2^+, второй положительной (2PG, 337.1 нм) и первой положительной (1PG, 750.5 и 670.5 нм) систем, измеренные во время ракетного запуска 13.XII.1972 г. на о. Хейса. Измерения показали, что интенсивность полосы 337.1 нм приблизительно в 4 раза слабее интенсивности полосы 391.4 нм, которая является одной из самых интенсивных полос молекулярного азота во время воздействия на полярную ионосферу авроральных частиц. Аналогичный результат был получен во время ракетных измерений на полигоне Churchill Research Range в марте 1974 г. [Sharp et al., 1979]. В работе [Sharp et al., 1979] также были приведены высотные профили интегральных интенсивностей свечения полос первой отрицательной системы (1NG, 391.4 нм) и второй положительной (2PG, 337.1 нм), результаты измерений показали то же самое соотношение интенсивностей данных эмиссий.

Анализ механизмов образования и гашения молекул $N_2(C^3\Pi_u,v)$ в полярной ионосфере [Кириллов и др., 1987] указывает на то, что электронное возбуждение молекул азота в состояние $C^3\Pi_u$ на высотах полярной ионосферы происходит при столкновении с высокоэнергичными авральными частицами и вторичными электронами

$$e + N_2(X^1\Sigma_g^+,v=0) \rightarrow e + N_2(C^3\Pi_u,v) \quad . \qquad (2)$$

Поэтому в полярной ионосфере интенсивности полос второй положительной системы N_2 определяются балансом скоростей процессов (1) и (2).

На высотах свечения красных спрайтов, эльфов, голубых и гигантских джетов (от 15 км до высот нижней ионосферы) [Pasko, 2003] концентрации атмосферных составляющих намного выше, чем концентрации на высотах ионосферы. Это неизбежно сказывается на кинетике электронно-возбужденных молекул азота, поскольку рост атмосферного давления усиливает роль столкновительных процессов в кинетических

процессах. Поэтому при расчете интенсивностей свечения полос второй положительной системы N_2 в дополнение к процессам (1) и (2) необходимо учитывать столкновительные процессы.

В настоящей работе особое внимание уделено кинетике гашения электронного состояния $C^3\Pi_u$ при столкновениях с молекулами N_2 и O_2 и проводится расчет колебательной населенности $N_2(C^3\Pi_u,v=0\text{-}4)$ для высот средней атмосферы Земли.

Расчет констант гашения $N_2(C^3\Pi_u,v=0\text{-}4) + N_2$

В работе [Kirillov, 2018] проведен расчет констант гашения электронного возбуждения молекулы $N_2(C^3\Pi_u, v=0\text{-}4)$ молекулярным азотом. Расчеты проводились с помощью аналитических выражений, основанных на приближении Розена-Зинера [Kirillov, 2004, 2016]. При рассмотрении межмолекулярных процессов переноса энергии возбуждения были учтены как процессы перераспределения энергии внутри состояния $C^3\Pi_u$

$$N_2(C^3\Pi_u,v=0\text{-}4) + N_2(X^1\Sigma_g^+,v^*) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+,v''\geq 0) + N_2(C^3\Pi_u,v'=v-\Delta v) \ , \quad (3)$$

так и процессы переноса энергии возбуждения на другие триплетные состояния

$$N_2(C^3\Pi_u,v=0\text{-}4) + N_2(X^1\Sigma_g^+,v^*) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+,v''\geq 0) + N_2(W^3\Delta_u,B^3\Sigma_u^-,v') \ . \quad (4)$$

На рисунках 1 и 2 результаты теоретических расчетов в [Kirillov, 2018] сравниваются с экспериментально измеренными константами [Dilecce et al., 2006]. На рисунке 1 сравнение приведено для процессов (3), а на рисунке 2 – для процессов электронного гашения (4).

Как видно из приведенных рисунков, результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Лишь для колебательного уровня v=4 наблюдается расхождение в два раза для процессов электронного гашения, когда перенос энергии возбуждения происходит на другие триплетные состояния молекулярного азота.

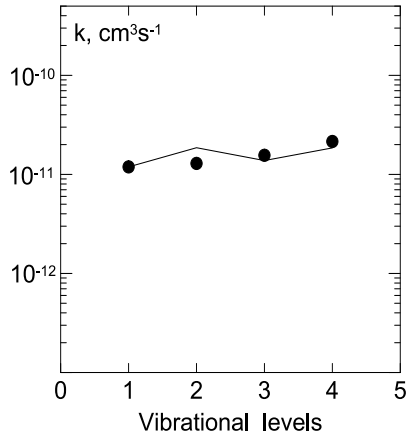


Рисунок 1. Рассчитанные константы гашения для процесса (3) (сплошная линия) [Kirillov, 2018] сравниваются с экспериментальными данными [Dilecce et al., 2006] для колебательной релаксации (круги).

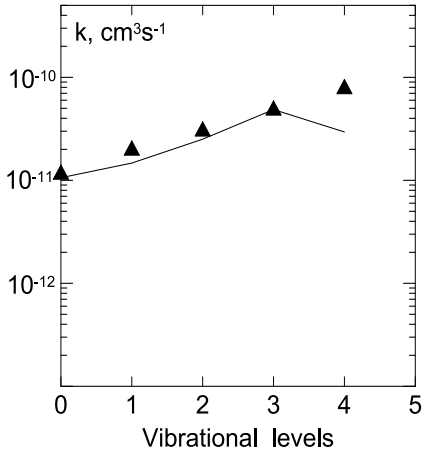


Рисунок 2. Рассчитанные константы гашения для процесса (4) (сплошная линия) [Kirillov, 2018] сравниваются с экспериментальными данными [Dilecce et al., 2006] для процессов гашения (треугольники).

Расчет колебательной населенности состояния $N_2(C^3\Pi_u,v=0\text{-}4)$ на высотах средней атмосферы

В работе [Heavner et al., 2010] был приведен спектр свечения спрайтов в диапазоне 320-460 нм, зарегистрированных 28.07.1998. Приведенный спектр явно демонстрировал доминирование полос второй положительной системы 2PG N_2 (процесс 1) над полосами первой отрицательной системы 1NG N_2^+, что указывает на принципиальное отличие спектров свечения молекул азота на высотах спрайтов и полярной ионосферы, где интенсивность свечения полосы 391.4 нм (1NG N_2^+) приблизительно в 4 раза выше свечения полосы 337.1 нм (2PG N_2) [Кириллов и др., 1987; Sharp et al., 1979]. Аналогичные результаты были получены во время исследований, связанных с лабораторными разрядами в среде чистого азота [Gallimberti et al., 1974; Hoder et al., 2015]. В лабораторных исследованиях было получено, что интенсивности полос второй положительной системы 2PG N_2 намного превосходят интенсивности полос первой отрицательной системы 1NG N_2^+.

Связано это с тем, что спектры высокоэнергичных электронов, возбуждающих атмосферный молекулярный азот в процессах (2), принципиально различаются для условий полярной ионосфере и для условий в спрайтах и лабораторного разряда. Пороги возбуждения состояний $C^3\Pi_u$ (N_2) и $B^2\Sigma_u^+$ (N_2^+) имеют значения 11.0 и 18.7 эВ соответственно [Радциг и Смирнов, 1980]. Более «мягкие» спектры электронов в спрайтах и в условиях лабораторного разряда эффективнее возбуждают состояние $C^3\Pi_u$ (N_2), а столкновения (2) с более «жесткими» спектрами авроральных электронов приводят к большим интенсивностям свечения полос 1NG N_2^+.

В настоящей работе проведен расчет колебательных населенностей $N_2(C^3\Pi_u,v=0\text{-}4)$ для высот атмосферы Земли 0, 20, 40, 60 км (т.е. давлений 10^5, $10^5/4^2$, $10^5/4^4$, $10^5/4^6$ Па) как для смеси $[N_2]/[O_2]=4:1$, так и для среды, состоящей из одного молекулярного азота N_2. При расчете были учтены константы гашения молекулами азота, приведенные на рисунках 1 и 2 [Kirillov, 2018]. Константы гашения $N_2(C^3\Pi_u,v=0\text{-}4)$ при столкновении с молекулами кислорода брались согласно лабораторным экспериментальным данным [Pancheshnyi et al., 2000].

На рисунках 3 и 4 приведены рассчитанные относительные колебательные населенности состояния $C^3\Pi_u$ при различных давлениях для атмосферы Земли и для условий разряда в чистом азоте. Расчет наглядно показал, что учет столкновительных процессов очень важен при исследованиях кинетики молекулы $N_2(C^3\Pi_u)$ и свечения полос второй положительной системы молекулярного азота (2PG N_2) как на различных высотах атмосферы Земли, так и для условий разряда в чистом азоте. С ростом давления среды происходит уменьшение относительных концентраций более высоких уровней состояния $C^3\Pi_u$ как в атмосфере Земли, так и в условиях разряда в чистом азоте. Вклад столкновительных процессов в колебательную населенность $N_2(C^3\Pi_u)$ заметно ослабевает лишь при давлениях ~10^2 Па и ниже.

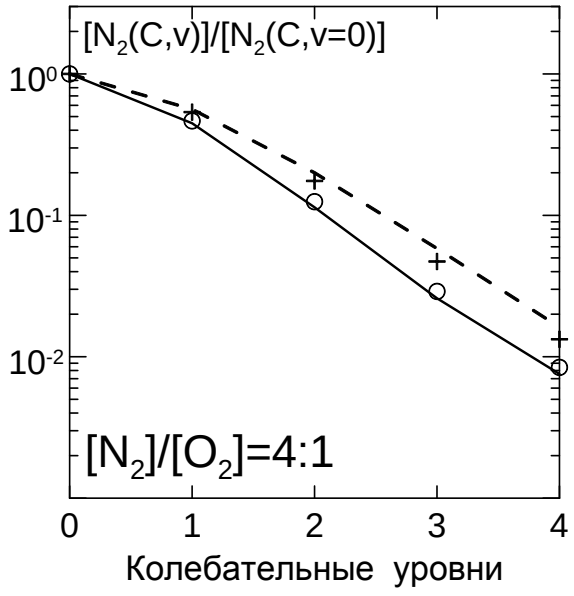


Рисунок 3. Рассчитанные относительные колебательные населенности состояния $C^3\Pi_u$ для атмосферы Земли (0, 20, 40, 60 км) (сплошная линия, круги, крестики, пунктиры).

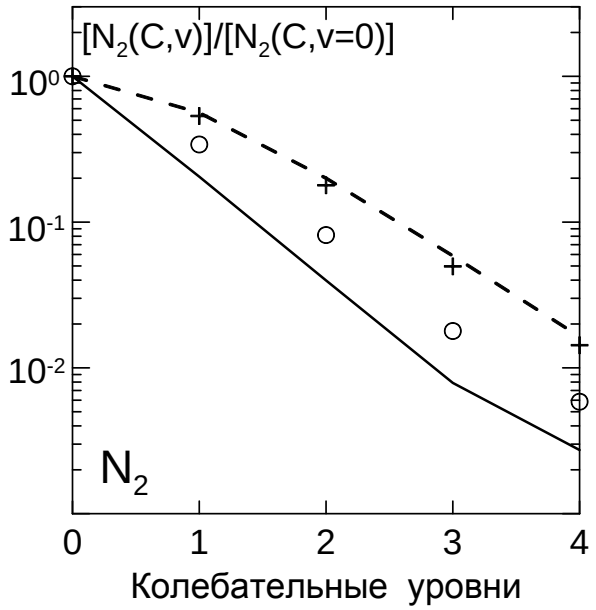


Рисунок 4. Рассчитанные относительные колебательные населенности состояния $C^3\Pi_u$ для условий разряда в чистом азоте (давление 10^5, $10^5/4^2$, $10^5/4^4$, $10^5/4^6$ Па) (сплошная линия, круги, крестики, пунктиры).

Заключение

Проведен расчет относительных колебательных населенностей состояния $C^3\Pi_u$ при различных давлениях для атмосферы Земли и для условий разряда в чистом азоте. При расчетах учитывались впервые рассчитанные константы гашения состояния $C^3\Pi_u$ при столкновениях с молекулами азота [Kirillov, 2018] с учетом продуктов неупругого взаимодействия в процессах колебательной релаксации (3) и электронного гашения (4). Показано, что учет столкновительных процессов очень важен при исследованиях кинетики молекулы $N_2(C^3\Pi_u)$ и свечения полос второй положительной системы молекулярного азота на различных высотах атмосферы Земли и в условиях разряда в чистом азоте при атмосферных давлениях ~10^2 Па и выше.

Литература

1. Кириллов А.С., Ягодкина О.И., Иванов В.Е., Воробьев В.Г., 1987, Геомагнетизм и Аэрономия, т.27, с.419-427.
2. Радциг А.А., Смирнов Б.М., Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980.
3. Dilecce G., Ambrico P.F., De Benedictis S., 2006, Chem. Phys. Lett., v.431, p.241-246.
4. Gallimberti I., Hepworth J.K., Klewe R.C., 1974, J. Phys. D: Appl. Phys., v.7, p.880-898.
5. Heavner M.J., Morrill J.S., Siefring C. et al., 2010, J. Geophys. Res., v.115, A00E44.
6. Hoder T., Bonaventura Z., Bourdon A., Simek M., 2015, J. Appl. Phys., v.117, 073302.
7. Kirillov A.S., 2004, Adv. Space Res., v.33, p.993-998.
8. Kirillov A.S., 2016, Chem. Phys. Lett., v.643, p.131-136.
9. Kirillov A.S., 2018, Chem. Phys. Lett., (accepted for print).
10. Pancheshnyi S.V., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu., 2000, Chem. Phys., v.262, p.349-357.
11. Pasko V.P., 2003, Nature, v.423, p.927-929.
12. Sharp W.E., Rees M.H., Stewart A.I., 1979, J. Geophys. Res., v.84, 1977-1985.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 51-54
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.51-54

КОЛЬСКАЯ АРКТИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРНАЯ СЕТЬ ПОЛЯРНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА: ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Б.В.Козелов, Я.А.Сахаров, Ю.В.Федоренко, Р.Ю.Юрик, В.Ф.Григорьев

ФГБНУ Полярный Геофизический Институт, Мурманск, Апатиты
(e-mail: boris.kozelov@gmail.com)

Аннотация. Полярный геофизический институт - единственный институт данного направления в европейской части России, полностью расположенный в Арктической зоне и обладающей здесь собственной научной инфраструктурой. Тематика научных исследований ПГИ соответствует Основным направлениям фундаментальных исследований «Программы фундаментальных научных исследований Российской академии наук». Научная и прикладная деятельность ПГИ включает в себя разработку и передачу пользователям технических инноваций для высокоширотных гео- и радио-физических наблюдений, мониторинг геомагнитных вариаций в широком частотном диапазоне, мониторинг космических лучей, мониторинг атмосферы Арктики, наблюдения полярных сияний и другие задачи в области физики высоких широт, что обусловлено местонахождением Института.
Необходимость освоения Арктики увеличивает актуальность научных исследований в этом регионе. К таким исследованиям проявляют интерес организации из других регионов, однако они зачастую ограничиваются экспедиционными исследованиями, которые существенно менее продуктивны, чем исследования на основе регулярных стационарных наблюдений. Для организации таких наблюдений и исследований может быть использована имеющаяся научная инфраструктура ПГИ.
Интеграция научной инфраструктуры ПГИ в Кольскую Арктическую геофизическую инфраструктурную сеть (КАГИС ПГИ) имеет целью эффективное использование имеющейся научной инфраструктуры, обеспечение её доступности исследователям из других регионов. Для полноты в описание КАГИС ПГИ включена также обсерватория ПГИ "Баренцбург", находящаяся вне территории РФ, а также некоторые объекты в других регионах России, поддерживаемые ПГИ совместно с другими организациями. В докладе представлено описание, состав КАГИС ПГИ, регламент доступа, возможные формы использования.

Abstract. Polar Geophysical Institute (PGI) is the only institute of this profile in European Russia, which is fully located in the Arctic zone and possesses its own scientific infrastructure. The PGI research topics are consistent with the Main directions of basic research of the Program of basic scientific research of the Russian Academy of Sciences. Scientific and applied PGI activities include the high-latitude geo- and radio-physical observations, monitoring of the geomagnetic variations in a wide frequency range, monitoring of the cosmic rays, monitoring of the the atmosphere of the Arctic, auroral observations, and other tasks in the high-latitude physics.
The need to develop the Arctic region increases the relevance of scientific research in it. Such studies are of interest to organizations from other regions, but they are often limited to expeditionary studies that are substantially less productive than studies based on regular stationary observations. For the organization of such observations and studies, the available PGI resources can be used. Integration of the PGI scientific infrastructure in the Kola Arctic Geophysical Infrastructure Network (KAGIN PGI) is aimed at its effective use and ensuring its accessibility to researchers from other regions. For completeness, the "Barentsburg" Observatory, which is located outside the territory of the Russian Federation, as well as some facilities in other regions of Russia, supported by the PGI together with other organizations, are also included in the description of KAGIN. The report provides a description, composition of KAGIS PGI, access regulations, possible forms of the use.

Описание КАГИС ПГИ

Общее описание научной инфраструктуры Полярного геофизического института, интегрированной в Кольскую Арктическую геофизическую инфраструктурную сеть (КАГИС ПГИ) представлено на сайте http://pgi.ru/kagin/ (рисунок 1). Дано общее описание цели и задач создания КАГИС ПГИ, описание инфраструктурных объектов, перечислены размещенные на них приборы и оборудование. Приведен перечень типовых работ и услуг, выполнение которых возможно с использованием КАГИС ПГИ, а также документы, регламентирующие их проведение.

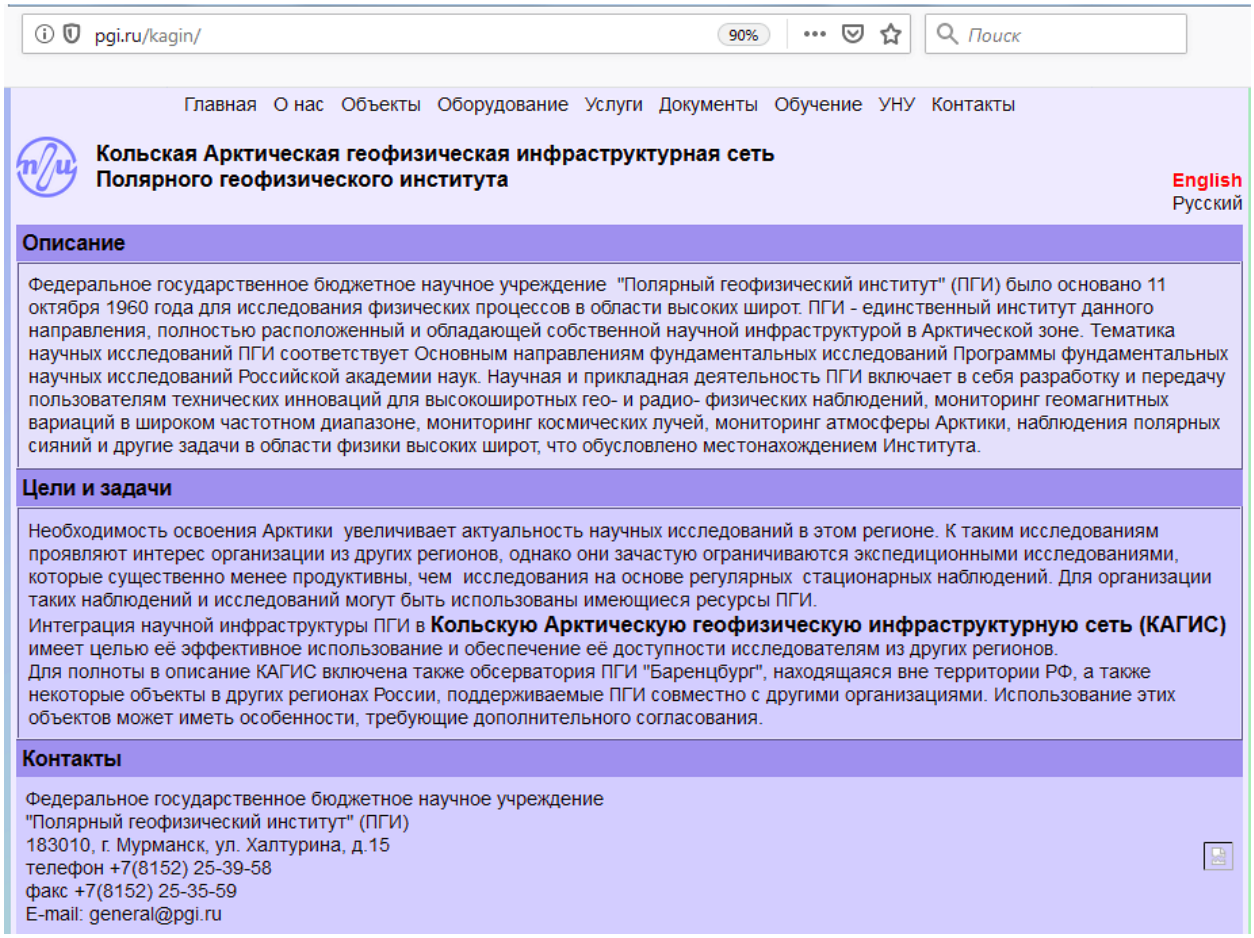


Рисунок 1. Начальная страница сайта КАГИН ПГИ.

Объекты КАГИС ПГИ по расположению

В состав КАГИС ПГИ входят 5 объектов на территории Кольского полуострова, предназначенных для проведения геофизических и радиофизический наблюдений:

Обсерватория ПГИ "Ловозеро"

Обсерватория расположена в 7 км на юго-восток от п.Ловозеро, в хорошей транспортной доступности. Имеется доступ к сети Интернет. В обсерватории имеется лабораторное и вспомогательное здания, два магнитных павильона, оптический павильон.



Обсерватория ПГИ "Лопарская"

Обсерватория расположена в 40 км к югу от города Мурманск, вблизи п.Мокрая Кица, в хорошей транспортной доступности. На территории обсерватории расположены лабораторное здание и магнитный павильон.



Радиофизический полигон ПГИ "Верхнетуломский"

Полигон расположен вблизи от п.Верхнетуломский, транспортная доступность хорошая. Полигон оборудован видеонаблюдением, а также доступом к сети Интернет. На полигоне расположены техническое и вспомогательное здания, магнитный и оптический павильоны.



Радиофизический полигон ПГИ "Туманный"

Полигон расположен на север от п.Туманный, транспортная доступность затруднена, особенно зимой.
На полигоне имеется лабораторное здание, магнитный павильон и антенное поле радара частичных отражений.



Полигон ПГИ "Апатиты"
Полигон расположен в 5 км на запад от города Апатиты. В зимнее время проезд по территории полигона затруднен из-за снега. На территории расположено кирпичное здание и склад.

Кроме того, к КАГИН отнесены также научно-исследовательские объекты ПГИ в г. Мурманск и г.Апатиты, где работает большая часть сотрудников института. Административный корпус и лабораторное здание ПГИ в Мурманске расположены в центре города, в хорошей транспортной доступности. В Апатитах ПГИ расположен в двух зданиях в центре города, в Академгородке, также в хорошей транспортной доступности. Здания оборудованы внутренней локальной сетью с выходом в Интернет.
Для полноты в описание КАГИС ПГИ включена также обсерватория ПГИ "Баренцбург", находящаяся вне территории России (на арх.Шпицберген), а также некоторые объекты и приборы в других регионах России, поддерживаемые ПГИ совместно с другими организациями, в частности уникальная научная установка "Радиотомографическая установка ПГИ".

Оборудование КАГИС ПГИ

В разделе оборудование приведен перечень научно-исследовательского оборудования приборов, имеющихся на объектах КАГИС с сортировкой по расположению и по видам наблюдений. Большая часть приборов работают в режиме постоянной регистрации (мониторинга). В таком режиме регистрируются:
- характеристики космических лучей;
- состояния ионосферы Земли;
- оптические явления в атмосфере в видимом диапазоне (полярные сияния);
- геомагнитные вариации в широком диапазоне частот;
- естественное электромагнитное поле в диапазоне частот от 0.1 Гц до 10 кГц;
- состояние нижней атмосферы.

Кроме того, имеется возможность проведения полевых и морских научных экспериментов с применением мобильных измерительных комплексов института.
Описание большинства приборов приведены в системе МГУ «Истина», куда ведут соответствующие ссылки. При наличии, даны ссылки на сетевые архивы данных отдельных прибора.

Перечень выполняемых работ, оказываемых услуг с использованием КАГИС ПГИ

С использованием оборудования и инфраструктуры КАГИС ПГИ предоставляется возможность выполнения следующих типовых работ и услуг:

1. Выполнение научно-исследовательских работ на оборудовании КАГИС ПГИ.
2. Оказание услуг по предоставлению оборудования КАГИС ПГИ для проведения научных исследований при участии сотрудников ПГИ.
3. Оказание услуг по предоставлению инфраструктуры КАГИС ПГИ для проведения научных исследований сотрудников Заказчика (сторонней организации) с использованием его собственного оборудования.
4. Оказание услуг по обеспечению проведения совместных научных исследований на оборудовании КАГИС ПГИ и оборудовании Заказчика (сторонней организации).
5. Услуги по организации обучения студентов высших учебных заведений, в том числе производственной практики.

Доступ к оборудованию осуществляется на договорной основе в соответствии с «Регламентом доступа к оборудованию Кольской Арктической геофизической инфраструктурной сети «Полярного геофизического института», выполнения работ и (или) оказания услуг для проведения научных исследований, а также осуществления экспериментальных разработок в интересах третьих лиц» (http://pgi.ru/kagin/documents/reglament.rtf)

Заключение

Необходимость освоения Арктики увеличивает актуальность научных исследований в этом регионе. К таким исследованиям проявляют интерес организации из других регионов, однако они зачастую ограничиваются экспедиционными исследованиями, которые существенно менее продуктивны, чем исследования на основе регулярных стационарных наблюдений. Для организации таких наблюдений и исследований может быть использована имеющаяся научная инфраструктура ПГИ.
Интеграция научной инфраструктуры ПГИ в Кольскую Арктическую геофизическую инфраструктурную сеть (КАГИС ПГИ) имеет целью эффективное использование имеющейся научной инфраструктуры, обеспечение её доступности исследователям из других регионов. Естественная интеграция с развитой исследовательской сетью скандинавских стран, основанная на многолетнем сотрудничестве, также повышает потенциальные возможности проводимых здесь исследований. В докладе представлено описание, состав КАГИС ПГИ, регламент доступа, возможные формы использования.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 55-58
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.55-58

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ КАК ИНСТРУМЕНТ СОЗДАНИЯ СЕТИ НАУЧНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ.

На примере норвежско-российского проекта ASTRA — "The Arctic Space Training".

Б.В.Козелов[1], Е.И.Скиотис[1], Ю.В.Балабин[1], А.А. Чернышов[2], W.J. Miloch[3]

1. *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Полярный геофизический институт", Мурманск-Апатиты (ПГИ)*
2. *ИКИ РАН, г.Москва*
3.*University of Oslo, Norway*
skiotis@pgi.ru

Аннотация. В статье проанализированы особенности международного сотрудничества в образовательной сфере университетов и научно-исследовательских институтов России и Норвегии на примере норвежско-российского проекта ASTRA – «The Arctic Space Training». В работе рассматривается опыт организации в рамках проекта первой летней школы на Шпицбергене.

Abstract. The article considers the peculiarities of international cooperation within educational activity between educational and scientific Institutes within educational activity. It views implementation of Norwegian-Russian project ASTRA – «The Arctic Space Training» on the place and analyzes experience of organization the first Summer School on Svalbard.

Цели и задачи проекта ASTRA — "The Arctic Space Training"

В мае 2018 года началась деятельность в рамках норвежско-российского проекта ASTRA — "The Arctic Space Training", рассчитанного на 3 года и финансируемого норвежским фондом SIU. Российско-норвежский образовательно-научный проект ASTRA (Arctic Space Training) посвящен в первую очередь созданию обучающей платформы для научно-исследовательской подготовки аспирантов и студентов в области космической науки, ориентируясь на норвежские и российские арктические регионы.

Основной **целью проекта** ASTRA – «The Arctic Space Training» является налаживание долговременных связей между научными группами из Норвегии и России для совместного изучения проявлений космической погоды в высоких широтах, а также подготовка нового поколения квалифицированных молодых исследователей.

Основные задачи проекта:

- разработать научно-образовательную программу для дипломников и аспирантов российских и норвежских университетов по изучению околоземного пространства в полярных районах;
- наладить процедуру студенческих обменов между организациями - участниками проекта;
- создать современную инфраструктуру для исследовательской работы студентов и аспирантов, включающую аппаратуру и данные спутниковых, ракетных и наземных наблюдений;
- объединить научные группы Норвегии и России в международный открытый центр по изучению проявлений космической погоды на высоких широтах;
- способствовать подготовке нового поколения квалифицированных молодых исследователей, способных разрабатывать новые экспериментальные проекты.

Партнерские организации, участвующие в реализации проекта

В реализации проекта принимают участие исследователи, преподаватели, аспиранты и студенты Университета Осло (Осло), Арктического университета Норвегии - Университета Тромсе (Тромсе), Университетского Центра на Свальбарде UNIS (Лонгйир), Института космических исследований РАН (Москва), Полярного геофизического института (Мурманск- Апатиты), Высшей Школы Экономики (Москва) и Института физики Земли РАН (Москва).

Учебно-методический опыт организации российско-норвежской летней школы для студентов и аспирантов на Шпицбергене

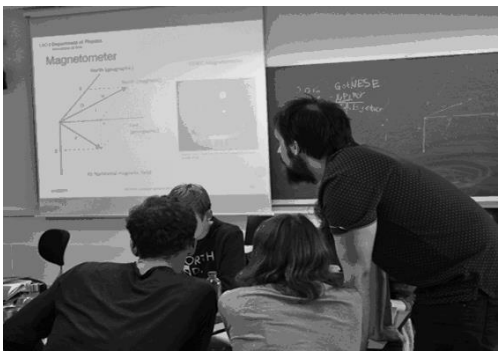
В августе 2018 г. рамках проекта ASTRA – «The Arctic Space Training» была проведена первая летняя школа. Уникальность данной школы состоит в том, что она проводилась на Шпицбергене, на базе обсерваторий Университетского Центра на Свальбарде UNIS в Лонгйире и Полярного геофизического института в Баренцбурге. Обучение носило как теоретический, так и практический характер, участники прослушали курс лекций, а также интенсивно работали с наблюдательными данными.
Под руководством 6 педагогов и исследователей из организаций-партнеров 19 студентов и молодых ученых из России и Норвегии изучали свойства ионосферы в авроральной области, в каспе и в полярной шапке с использованием данных со спутников, ракет, а также наземного оборудования научных российских и норвежских центров на Шпицбергене: сети магнитометров, GPS/ГЛОНАСС приемников, радаров EISCAT и SuperDARN, оптических камер для изучения полярных сияний. Участники школы разрабатывали собственные мини-проекты с использованием уникальных ресурсов крупнейших научных баз Шпицбергена.

Теоретический компонент программы обучения в летней школе:

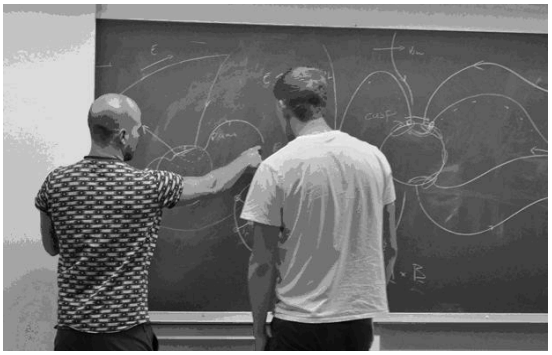
В контексте основной образовательной направленности школы аспиранты и студенты прослушали лекции по следующим дисциплинам:

- Space Plasma (solar wind – Earth interactions);
- Magnetosphere; Magnetic field, magnetometers, and indices (Dst, Kp, etc.);
- Ionosphere; Auroral phenomena; EISCAT;
- SuperDARN and Optical instruments; Satellites, in situ instruments, GPS; Cosmic Rays;
- How to prepare a presentation.

Участником школы также была предоставлена информация о том, как искать и использовать различные данные космических наблюдений (радарные данные EISCAT и SuperDARN, данные сети магнитометров, спутниковые наблюдения, оптических камер, геомагнитных индексов).



Работа в группах в университетском центре UNIS, студенты учатся работать с данными магнитометров. Лекцию по магнитометрам прочитал Andres Spicher.



Лекция в университетском центре UNIS. Andres Spicher отвечает на вопросы студента из Университета Тромсе Andreas Hansen.

Практический компонент программы обучения в летней школе:

При организации самостоятельной групповой работы, координаторами школы учитывались принципы равных образовательных возможностей участников, особенности состава группы, организация коммуникации в группе и между группами, а также итоговая рефлексия учебной деятельности.
В связи с вышеперечисленными требованиями, в каждой группе были представители разных Институтов и стран и равное количество аспирантов, поскольку предполагалось, что аспиранты имеют больший научно-практический опыт. Рабочий язык в группах был английский, уровень владения которым на уровне Intermediate, было одним из условий отбора участников. Участники, в ходе обсуждения, определили уникальное имя своей команды, которое использовалось на протяжении всей школы ("Guardians of the Near Earth Space Environment", Jupiter, "Лёдbryter", "Fantastic four").
При подготовке заданий для студенческих команд организаторами соблюдались следующие условия: задания, требовали выполнения большого объема работы; для выполнения задач необходимо было использовать разнообразные знания и умения, всей совокупностью которых не владел ни один из участников индивидуально, но владела группа в целом; требовалось генерировать максимальное количество оригинальных идей.

Таким образом, каждая студенческая группа слепым жребием получила данные радара некогерентного рассеяния EISCAT соответствующие некому интересному случаю (case study). Во время групповых занятий для всестороннего изучения этого случая и понимания физики явлений и протекающих процессов, студенты должны были найти и привлечь другие данные соответствующие этому случаю (магнитометры, GPS-ГЛОНАСС, спутниковые данные в солнечном ветре, оптические проявления, динамика геомагнитных индексов). В последний день школы каждая команда подготовила и представила презентацию на 15-20 минут, где были продемонстрированы не только разнообразные данные наблюдений, но и дана их интерпретация. Каждый представитель команды должен был выступить и рассказать свою часть.



Практическое занятие в UNIS. Команды "Guardians of the Near Earth Space Environment", Jupiter и "Лёдbryter".



Групповое занятие – «мозговой штурм». Команда "Guardians of the Near Earth Space Environment"

Организация занятий и мероприятий.

Занятия и лекции большей частью проводились на базе норвежского университетского центра UNIS (Лонгйир, Норвегия). Для формирования у студентов более полного представления о таком наземном оборудовании научных российских и норвежских центров на Шпицбергене, как магнитометры, GPS/ГЛОНАСС приемники, радары EISCAT и SuperDARN, оптические камеры для изучения полярных сияний, в программу были включены ознакомительные визиты в обсерваторию КНО (оптические наблюдения и SuperDARN) и на радар некогерентного рассеяния EISCAT. Также для участников школы была организована двухдневная поездка в Баренцбург (Россия), где участники прослушали лекцию заведующего сектором космических лучей ПГИ Ю.В.Балабина «Космические лучи как глобальный феномен Солнечной системы», а также посетили обсерваторию Полярного геофизического института.



Экскурсия на EISCAT. Участники летней школы и преподаватели

Необходимо отметить, что в программу школы были включены и культурные мероприятия, направленные на формирование эмоционального восприятия Арктики, стимулирования интереса к этой уникальной и суровой части Земли, где даже обычные прогулку по близлежащим горам требуют хорошей физической подготовки, умения работать в команде и координировать свои действия с другими членами группы.

Заключение

С целью выявления эффективности научно-образовательных мероприятий такого типа, нами был проведен опрос студентов школы и преподавателей, принимавших участие в работе. В результате анализа обратной связи участников, можно констатировать, что первая школа в рамках проекта ASTRA прошла успешно. Аспиранты и студенты не только приобрели теоретические и практические умения, но также много и активно общались между собой и с преподавателями, студенты из разных стран и Институтов установили хорошие рабочие и дружеские отношениями, что, безусловно, становится основой для дальнейшего научного международного сотрудничества.
В марте 2019 г. в г.Апатиты (Россия) на базе Полярного геофизического института будет проведена зимняя школа для студентов и аспирантов, участников проекта ASTRA, при организации которой будет учитываться опыт летней школы на Шпицбергене.

Благодарность

Авторы благодарят Норвежский Центр Международного Сотрудничества в сфере Образования - SIU (CPRU-2017/10068).
Authors acknowledge the Norwegian Center for International Cooperation in Education - SIU (CPRU-2017/10068).

.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 59-62.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.59-62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

О.М. Лебедь[1], Ю.В. Федоренко[1], Ю. Маннинен[2], Н.Г. Клейменова[3], А.С. Никитенко[1]

[1] *Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты*
[2] *Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, Finland*
[3] *Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), г. Москва*

Аннотация. Представлен метод расчета трех компонент электромагнитного поля ОНЧ аврорального хисса на земной поверхности, инициированных случайными электростатическими волнами, возникающими на высотах от 5 тыс. до 20 тыс. км вследствие черенковского резонанса. Основное внимание уделено численному моделированию рассеяния электростатических волн на случайных ионосферных неоднородностях на высотах от 1500 до 3000 км в конус прохождения к земной поверхности. Приводятся результаты расчетов средних значений кажущихся азимутов области выхода и их плотностей распределений. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными оценками этих величин.

Abstract. The method of calculating three components of the VLF electromagnetic field of auroral hiss on the Earth's surface, initiated by random electrostatic waves generated at altitudes of 5,000-20,000 km due to Cherenkov resonance is presented. The main attention is paid to the numerical simulation of the scattering of electrostatic waves into the propagation cone at random ionospheric inhomogeneities located at altitudes from 1500 to 3000 km. The results of calculations of both the average values of the apparent backazimuths of the exit point and their probability density functions are given. The simulation results are consistent with the estimates based on observations.

Введение

По сложившемуся мнению, генерация аврорального хисса происходит на высотах от 5 тыс. до 20 тыс. км потоком высыпающихся электронов с энергиями от 100 эВ до 10 кэВ и скоростями от 6 до 60 тыс. км/с вследствие черенковского резонанса. Необходимым условием черенковского резонанса является условие совпадения проекций фазовой скорости возникающей свистовой волны и скорости электрона на направление силовой линии внешнего магнитного поля $n_z=k_z/k_0=c/\upsilon_e\cos\theta$, $k_0=\omega/c$, c - скорость света в вакууме, ω - круговая частота волны, υ_e - скорость электрона, θ - питч-угол, $\mathbf{k}$ - волновой вектор. Из этого условия следует, что возникающая свистовая волна является электростатической с $n_\perp>>1$, $n_\perp$ - перпендикулярная к внешнему магнитному полю компонента вектора показателя преломления $\mathbf{n}=\mathbf{k}/k_0$. Электростатические волны с характерными для аврорального хисса частотами от 4 до 15 кГц не могут выйти к земной поверхности, так как для них не выполняется условие распространения в волноводе Земля-ионосфера $n_\perp\leq1$. Для того, чтобы электростатическая волна могла стать электромагнитной и выйти к земной поверхности, она должна испытать рассеяние на ионосферных неоднородностях ΔN_e, причем некоторая часть волновых нормалей рассеянных волн должна попасть в конус прохождения $n_\perp\leq1$. Наиболее вероятно, что выходящий к наземному наблюдателю авроральный хисс есть результат рассеяния волн на ионосферных неоднородностях, находящихся на высоте от 1500 до 3000 км, поскольку электростатические волны с частотами, характерными для аврорального хисса, не могут достичь нижней ионосферы из-за нижнегибридного отражения на высотах порядка 800-1000 км. Таким образом, рассеяние на неоднородностях является важным физическим механизмом, объясняющим возможность наземной регистрации аврорального хисса.

Результаты наблюдений на земной поверхности показывают, что изменения во времени компонент поля аврорального хисса на интервалах порядка нескольких минут вполне могут рассматриваться как стационарный случайный процесс. Вследствие этого азимутальные углы прихода излучения к наземному наблюдателю, отождествляемые с направлением вектора Пойнтинга, также случайны. Этот факт дает возможность рассматривать не только средние значения углов прихода, но и их плотности распределения вероятности на интервалах стационарности. Как будет показано ниже на основе результатов моделирования, по распределениям углов можно оценивать не только азимут области выхода, но и ее размеры и расстояние до точки наблюдений.

Углы волновых нормалей с внешним магнитным полем, попавших после рассеяния на неоднородностях в конус прохождения волн, малы. Такие волны не испытывают нижнегибридного отражения, достигают нижней ионосферы и могут выйти в волновод Земля-ионосфера. Расчет распространения свистовых волн в нижней ионосфере не может быть выполнен в приближении геометрической оптики из-за больших значений градиента показателя преломления на высотах ниже 100-120 км. Однако, на этих высотах и даже до высот, занятых неоднородностями, с достаточной степенью точности можно считать ионосферу плоскослоистой. Это предположение позволяет применить для моделирования распространения аврорального хисса от

области, занятой неоднородностями, до земной поверхности хорошо известный метод численного решения волнового уравнения, известный также как полновой или full-wave метод.

В настоящей работе мы представляем метод расчета ОНЧ полей на земной поверхности, инициированных случайными электростатическими волнами, возникающими на высотах от 5 тыс. до 20 тыс. км вследствие черенковского резонанса. Основное внимание уделено численному моделированию рассеяния электростатических волн в конус прохождения к земной поверхности на случайных ионосферных неоднородностях на высотах от 1500 до 3000 км. Приводятся результаты расчетов средних значений кажущихся азимутов области выхода и их плотностей распределений. Результаты моделирования соответствуют экспериментальным оценкам этих величин, приведенным в [1]. Первым этапом моделирования рассеяния на неоднородностях является задание тензора диэлектрической проницаемости однородной ионосферной плазмы.

Расчет тензора диэлектрической проницаемости

Состояние невозмущенной ионосферной холодной плазмы описывается тензором диэлектрической проницаемости $\hat{\varepsilon}_z$. В системе координат, в которой $\mathbf{B}_0 \,||\, \hat{z}'$, с учетом влияния ионов и столкновений ионов и электронов с нейтралами тензор диэлектрической проницаемости записывается следующим образом [9]

$$\hat{\varepsilon}_z = \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ -D & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}$$

где $S = (R+L)/2$, $D = (R-L)/2$. Если число сортов ионов равно K, тогда

$$R = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_e - \omega_{He})} - \sum_{j=1}^{K} \frac{\omega_{pi,j}^2}{\omega(\omega + i\nu_{i,j} + \omega_{Hi,j})};\quad L = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_e + \omega_{He})} - \sum_{j=1}^{K} \frac{\omega_{pi,j}^2}{\omega(\omega + i\nu_{i,j} - \omega_{Hi,j})}$$

$$P = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_e)} - \sum_{j=1}^{K} \frac{\omega_{pi,j}^2}{\omega(\omega + i\nu_{i,j})},\ \text{где}\ \omega_{pe,i} = \sqrt{\frac{Nq_{e,i}}{\varepsilon_0 m_{e,i}}};\ \omega_{He,i} = \frac{|q_{e,i}|B_0}{m_{e,i}}$$

Здесь ω_{pe} и $\omega_{pi,j}$ - плазменные частоты электронов и ионов сорта j, соответственно, ω_{He} и $\omega_{Hi,j}$ - гирочастоты электронов и ионов, ν_e и $\nu_{i,j}$ - частоты столкновений электронов и данного сорта ионов с незаряженными частицами, N - концентрация заряженных частиц, $q_{e,j}$ - заряд и $m_{e,j}$ - масса электрона или иона. В данной работе мы учитываем только столкновения электронов и преобладающих на высотах больше 200 км ионов H^+, O^+ и He^+ с молекулами N_2 и O_2 [3]. Вклад тяжелых ионов, например, NO^+, на высотах ниже 200 км мал по сравнению с вкладом электронов, поэтому влиянием ионов в нижней ионосфере можно пренебречь.

Для расчета частоты столкновений электронов с нейтралами мы воспользовались работой [7]

$$\nu_{e,\mathrm{N_2}} = 2.33\cdot10^{-17} N_{\mathrm{N_2}} \left(1 - 1.21\cdot10^{-4} T_e\right) T_e;\ \nu_{e,\mathrm{O_2}} = 1.82\cdot10^{-16} N_{\mathrm{O_2}} \left(1 + 3.6\cdot10^{-2}\sqrt{T_e}\right)\sqrt{T_e};\ \nu_e = \nu_{e,\mathrm{N_2}} + \nu_{e,\mathrm{O_2}}$$

Частоты столкновений ионов H^+, O^+ и He^+ с нейтралами определялись в соответствии с работой [2]

$$\nu_{\mathrm{H^+}} = 3.5\cdot10^{-15} N_{\mathrm{N_2}} + 3.3\cdot10^{-15} N_{\mathrm{O_2}};\ \nu_{\mathrm{O^+}} = 1.1\cdot10^{-15} N_{\mathrm{N_2}} + 1.01\cdot10^{-15} N_{\mathrm{O_2}};\ \nu_{\mathrm{He^+}} = 1.8\cdot10^{-15} N_{\mathrm{N_2}} + 1.7\cdot10^{-15} N_{\mathrm{O_2}}$$

Здесь N_{N_2} и N_{O_2} - концентрации молекул N_2 и O_2 в м$^{-3}$, T_e - температура электронов в градусах Кельвина. Значения N_{N_2} и N_{O_2} дает модель IRI-2012 [3], а T_e - модель NRLMSISE-00 [7].

В случае произвольного направления вектора магнитного поля $\mathbf{B}_0$, тензор диэлектрической проницаемости $\hat{\varepsilon}_0$ получается поворотом $\hat{\varepsilon}_z$ из системы координат, в которой $\mathbf{B}_0 \,||\, \hat{z}'$, в систему координат с осью $\hat{z}$, направленной вертикально вверх. В новой системе координат $\hat{\varepsilon}_0 = \hat{R}\hat{\varepsilon}_z\hat{R}^{-1}$, ось $\hat{x}$ направлена на юг, ось $\hat{y}$ - на восток, что образует правую тройку векторов. Здесь $\hat{R}$ - матрица поворота.

$$\hat{R} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

Здесь θ - угол между $\mathbf{B}_0$ и вертикалью, ϕ - угол между осью $\hat{x}$ и проекцией $\mathbf{B}_0$ на горизонтальную плоскость. В данной работе для расчета величины магнитного поля Земли мы пользовались моделью Н.А. Цыганенко.

Расчет поля рассеяния в слое с неоднородностями

Пусть в выбранном слое есть область, заполненная неоднородностями (повышениями и понижениями) электронной концентрации ΔN_e, которые описываются тензором диэлектрической проницаемости $\Delta\hat{\varepsilon}$. Полный тензор диэлектрической проницамости $\hat{\varepsilon}$ для данного слоя является суммой невозмущенного тензора $\hat{\varepsilon}_0$ и возмущенного $\Delta\hat{\varepsilon}$: $\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}_0 + \Delta\hat{\varepsilon}$. На область с неоднородностями падает волна $\mathbf{E}_0$, которая, взаимодействуя с ΔN_e, приводит к возникновению поля рассеяния $\mathbf{E}_s$. Поле в области неоднородностей после

рассеяния представляет собой сумму измененного поля падающей волны $\mathbf{E}'_0$ и поля рассеяния $\mathbf{E}_s$: $\mathbf{E}' = \mathbf{E}'_0 + \mathbf{E}_s$. Чтобы найти поле рассеяния $\mathbf{E}_s$, решают волновое уравнение

$$\nabla\times\left(\nabla\times\mathbf{E}'\right)-k_0^2\hat{\varepsilon}\mathbf{E}'=0;\ \nabla\times\left(\nabla\times\mathbf{E}_s\right)-k_0^2\hat{\varepsilon}_0\mathbf{E}_s=k_0^2\Delta\hat{\varepsilon}\left(\mathbf{E}'_0+\mathbf{E}_s\right)$$

Для решения волнового уравнения мы использовали борновское приближение [5]. Оно основано на предположении, что $\mathbf{E}'_0 \gg \mathbf{E}_s$. Тогда рассеянным полем $\mathbf{E}_s$ можно пренебречь и поле внутри области ионосферы, заполненной неоднородностями - это поле падающей волны $\mathbf{E}' \approx \mathbf{E}'_0 \approx \mathbf{E}_0$

$$\nabla\times\left(\nabla\times\mathbf{E}_s\right)-k_0^2\hat{\varepsilon}_0\mathbf{E}_s\approx k_0^2\Delta\hat{\varepsilon}\mathbf{E}_0$$

Из уравнений Максвелла следует, что плотность тока $\Delta\mathbf{J}$, вызванная полем падающей волны $\mathbf{E}_0$, в борновском приближении определяется как

$$k_0^2\Delta\hat{\varepsilon}\mathbf{E}_0=ik_0Z_0\varepsilon_0\Delta\mathbf{J};\ \Delta\mathbf{J}=-ik_0\Delta\hat{\varepsilon}\cdot\mathbf{E}_0/\left(Z_0\varepsilon_0\right)$$

где Z_0 - импеданс свободного пространства.

В данной работе мы находили компоненты электромагнитного поля на земной поверхности, вызванного полем рассеяния $\mathbf{E}_s$ численно с помощью конечно-разностного метода решения волнового уравнения (full-wave метода), подробно описанного в работе [6]. Для применения этого метода необходимо записать плотность тока $\Delta\mathbf{J}$ как граничные условия для полей $\Delta\mathbf{E}_\perp$ и $\Delta\mathbf{H}_\perp$ на границе слоя с источником тока

$$\begin{array}{ccc}
\Delta\mathbf{E}_{xx}=0 & \Delta\mathbf{E}_{xy}=0 & \Delta\mathbf{E}_{xz}=Z_0n_x/\varepsilon_{33}\Delta J_z \\
\Delta\mathbf{E}_{yx}=0 & \Delta\mathbf{E}_{yy}=0 & \Delta\mathbf{E}_{yz}=Z_0n_y/\varepsilon_{33}\Delta J_z \\
\Delta\mathbf{H}_{xx}=0 & \Delta\mathbf{H}_{xy}=Z_0\Delta J_y & \Delta\mathbf{H}_{xz}=-Z_0\varepsilon_{23}/\varepsilon_{33}\Delta J_z \\
\Delta\mathbf{H}_{yx}=-Z_0\Delta J_x & \Delta\mathbf{H}_{yy}=0 & \Delta\mathbf{H}_{yz}=Z_0\varepsilon_{13}/\varepsilon_{33}\Delta J_z
\end{array}$$

Здесь первый индекс соответствует компоненте поля, а второй указывает, какая компонента тока ΔJ_x, ΔJ_y или ΔJ_z вызвала изменение в выбранной компоненте поля. Так, например, $\Delta\mathbf{E}_{xy}$ - это изменение в $\Delta\mathbf{E}_x$ компоненте, вызванное током ΔJ_y. Эти граничные условия используются для решения волнового уравнения, результатом которого являются компоненты поля $\mathbf{E}(n_x,n_y)$ и $\mathbf{H}(n_x,n_y)$ в k-области. Компоненты поля в физическом пространстве получаются обратным Фурье-преобразованием

$$\mathbf{E}(x,y)=\frac{k_0^2}{(2\pi)^2}\iint\mathbf{E}\left(n_x,n_y\right)e^{ik_0\left(n_xx+n_yy\right)}dn_xdn_y;\ \mathbf{H}(x,y)=\frac{k_0^2}{(2\pi)^2}\iint\mathbf{H}\left(n_x,n_y\right)e^{ik_0\left(n_xx+n_yy\right)}dn_xdn_y$$

Компоненты $\mathbf{E}_0$, падающей на область ионосферных неоднородностей, с точностью до постоянного множителя определяются нетривиальным решением однородного уравнения для невозмущенной среды

$$\left(n^2\mathbf{I}-\mathbf{n}\cdot\mathbf{n}^{\mathrm{T}}-\hat{\varepsilon}_0\right)\mathbf{E}_0=0$$

Горизонтальные компоненты вектора показателя преломления расчитываются из условия черенковского резонанса на высотах от 5 тыс. до 20 тыс. км. Далее предполагается, что $\mathbf{n}_\perp$ сохраняется при переходах из слоя в слой. Компонента n_z в слое с неоднородностями находится из дисперсионного уравнения, где $\hat{\varepsilon}_0$ вычисляется на высоте слоя с неоднородностями

$$\det\left(n^2\mathrm{I}-\mathbf{n}\cdot\mathbf{n}^{\mathrm{T}}-\hat{\varepsilon}_0\right)=0$$

Мы полагаем, что амплитуда волны $|\mathbf{E}_0|$ есть случайная величина, распределенная по Рэлею, а ее начальная фаза равномерно распределена в интервале $[0,2\pi]$. В настоящей работе необходимое для расчета тока $\Delta\mathbf{J}(x,y)$ поле неоднородностей определяется гауссовой плотностью распределения вариаций N_e и их пространственной корреляционной функцией с радиусом корреляции порядка нескольких десятков метров.

Результаты моделирования

На рисунке 1 приведены результаты моделирования поля ОНЧ хисса на частоте 8.5 кГц на земной поверхности. Область, занятая неоднородностями, располагалась на высоте 2000 км в точке с координатами (0,0) и имела форму эллипса, показанного на рисунке. Линия магнитного поля, проходящая через эту точку, пересекала земную поверхность в точке с координатами (70° N, 30° E). Расчитанное эффективное значение горизонтальной компоненты магнитного поля $H_{\mathrm{rms}}=(H_x^2+H_y^2)^{1/2}$, нормированное на максимальное значение, показано на рисунке 1 слева. Стрелками показано направление, обратное направлению вектора Пойнтинга, - кажущийся азимут области выхода ОНЧ хисса к земной поверхности. Из рисунка видно, что область выхода ОНЧ хисса от сильно вытянутой вдоль направления запад-восток неоднородности представляет собой почти круглое пятно с размерами, превышающими размеры области неоднородностей, с максимумами интенсивности, расположенными вокруг центра. По-видимому, такая форма области выхода определяется эффектами распространения через нижнюю ионосферу, а снижение интенсивности регистрируемого излучения к центру объясняется преобладающим влиянием возбуждаемых в неоднородностях токов, которые на этих высотах направлены вдоль магнитного поля и не излучают в этом направлении. Вектора, обратные направлению течения энергии, в основном направлены к центру рассеянного поля, однако на расстояниях

порядка 400 км от него это правило нарушается. Этот факт может быть объяснен влиянием волн, испытавших отражения от земной поверхности и от верхней стенки волновода Земля-ионосфера.

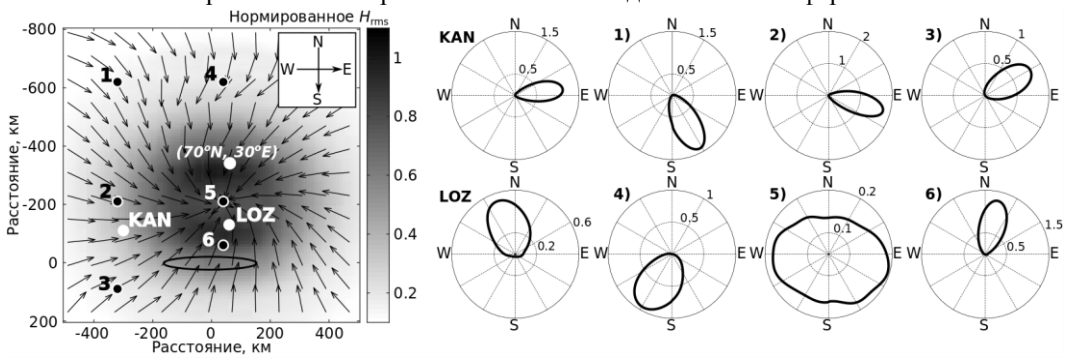


Рисунок 1. Результаты моделирования поля ОНЧ хисса на частоте 8.5 кГц на земной поверхности. Слева - нормированное H_{rms}, справа - плотности распределения кажущихся азимутов области выхода хисса в точках, соответствующих положениям обс. Ловозеро и обс. Кануслехто, и в шести дополнительных точках.

На рисунке 1 справа показаны плотности распределения кажущихся азимутов области выхода хисса в точках, соответствующих положениям обс. Ловозеро и обс. Кануслехто, и в шести дополнительных точках. Максимумы плотностей распределений кажущихся обратных азимутов, в основном, соответствуют направлениям на центр распределения интенсивности хисса (рис. 1, точки 1-4 и 6). В центре этой области (рис. 1, точка 5) плотность распределения ожидаемо стремится к однородному распределению вследствие того, что здесь направление на центр не определено. Приведенные на рисунках результаты моделирования убедительно свидетельствуют о том, что по результатам наблюдений авроральных хиссов можно определить направление на область их выхода из ионосферы, а по результатам наблюдений на двух разнесенных станциях можно оценить ее положение. Приведенные выше результаты справедливы для одиночной области выхода. К сожалению, ограниченный объем статьи не позволил рассмотреть рассеяние некогерентных волн на нескольких областях, занятых неоднородностями. Однако, стоит заметить, что и в этом случае рассмотрение плотностей распределений кажущихся азимутов дает ценную информацию о процессах генерации и распространения аврорального хисса.

Заключение

В данной работе основное внимание уделено численному моделированию рассеяния ОНЧ аврорального хисса на случайных ионосферных неоднородностях на высотах от 1500 до 3000 км в конус прохождения и расчету компонент поля на земной поверхности. Показано, что приведенные результаты расчетов средних значений кажущихся азимутов области выхода и их плотностей распределений согласуются с экспериментальными оценками этих величин.

Литература

1. Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.И., Турунен Т. Анализ аврорального ОНЧ хисса в обс. Ловозеро и вблизи обс. Соданкюля. Настоящий сборник.
2. Banks P. Collision frequency and energy transfer ions. Planet. Space Sci., 14:1105_1122, 1966.
3. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. The international reference ionosphere 2012 - a model of international collaboration. J. Space Weather Space Clim., 4(A07):1_12, 2014.
4. Bilitza D., Rawer K., Bossy L., Gulyaeva T. International reference ionosphere - past, present, future: II. plasma temperatures, ion composition, and ion drift. Adv. Space Res., 13(3):15_23, 1993.
5. Born M., Wolf E. Principles of optics. Pergamon Press, 6th edition, 1980.
6. Lehtinen N.G., Inan U.S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet. J. Geophys. Res., 113(A06301), 2008.
7. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. J. Geophys. Res., 107(A12):1468, 2002.
8. Rodriguez J. V. Modification of the Earth's ionosphere by very low frequency transmitters. Phd thesis, 1994.
9. Stix T.N. Waves in Plasmas. Springer, New York, 1992.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 63-66.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.63-66

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ МАГНИТОМЕТРОВ В РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ПОИСКОВ ЛОКАЛЬНЫХ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.А. Любчич, А.Е. Сидоренко, И.И. Демченко

Полярный геофизический институт, г. Мурманск (e-mail: lubchich@yandex.ru)

Аннотация. Радиоголографический метод является перспективным инструментом для решения задач рудной геофизики. Голографическая реконструкция распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре позволяет по площадным поверхностным наблюдениям магнитных компонент электромагнитного поля от контролируемого источника эффективно локализовать в пространстве аномальные области с повышенной электропроводностью, ассоциируемые с локальными рудными телами. Использование комплекса приемной и передающей аппаратуры с точной привязкой измеряемых сигналов и тока к мировому времени при помощи спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS дает возможность одновременно определять распределения не только амплитудных, но и фазовых характеристик компонент магнитного поля, что является необходимым условием для проведения голографической реконструкции распределения неоднородностей в среде. В 2017 году были проведены расширенные полевые исследования по применению радиоголографического метода в двухчастотном варианте для визуализации в земной коре рудных зон на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района. В результате проведенных полевых экспериментальных работ было показано, что двухчастотный вариант радиоголографического метода значительно повышает надежность интерпретации картины распределения неоднородностей в среде. Сравнение результатов голографической реконструкции на разных частотах позволяет отбраковывать «ложные» аномалии и выделять те аномальные зоны, которые можно ассоциировать с рудными телами.

Abstract. The radioholographic method is promising tool for solving problems of ore geophysics. Holographic reconstruction of distribution of geoelectric heterogeneities in the earth's crust allows to effectively localize in space anomalous areas with high electrical conductivity, associated with local ore bodies, by using the areal surface observations of magnetic components of electromagnetic field from the controlled source. The transmitting/receiving complex with precise GLONASS/ GPS timing is applied during observations. Due to the precise timing of recorded signals and current in the transmitting loop the distribution of not only the amplitude, but also the phase characteristics of magnetic field components is determined. It is the necessary condition for the holographic reconstruction of the distribution of heterogeneities in the medium. In 2017 extended field works were conducted for the visualization of ore zones in the earth's crust at the site Loipishnjun in the Monchegorsk ore region by using the two-frequency radioholographic method. As a result of the field experiment, it was shown that the two-frequency version of the radioholographic method significantly increases the reliability of the interpretation of the pattern of distribution of heterogeneities in the medium. The comparison of results of the holographic reconstruction at different frequencies allows one to reject "false" anomalies, and to identify those anomalous zones that can be associated with ore bodies.

Введение.

Применение радиоголографического метода является новым подходом, способствующим решению задач рудной геофизики по визуализации в земной коре геоэлектрических неоднородностей – зон с повышенной электропроводностью, перспективных на обнаружение рудных месторождений. Проведя площадные измерения магнитных компонент электромагнитного поля от контролируемого источника на изучаемом геологическом участке, с помощью голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре можно эффективно локализовать в пространстве аномальные электропроводящие зоны, ассоциируемые с локальными рудными телами. Действительно, при проведении частотных зондирований Земли в точках наблюдений фиксируется суперпозиция двух полей, первичного от контролируемого источника гармонических электромагнитных полей, которое в терминах голографии можно обозначить как опорную волну, и вторичные поля - аналоги предметных волн, обусловленные токами, которые индуцируются в аномально электропроводящих зонах земной коры. Существует интегральное уравнение, связывающее голографически реконструированное магнитное поле $\boldsymbol{H_H}$ с искомой функцией аномальных источников $\boldsymbol{j_m}$ [1]:

$$\boldsymbol{H}_H(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{H}_0(\boldsymbol{r}) + 2i\int_V d\boldsymbol{r}'\boldsymbol{j}_m(\boldsymbol{r}')\, Im\boldsymbol{G}_m(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') \qquad (1),$$

где $\boldsymbol{H}_0$ – напряженность нормального магнитного поля, определяемого контролируемым источником электромагнитных полей в отсутствии геоэлектрических неоднородностей в среде, $Im\ G_m$ – мнимая часть функции Грина магнитного типа, $\boldsymbol{j_m}$ – распределение плотности фиктивных магнитных токов, являющихся источниками аномальных полей, i – мнимая единица. Интегрирование ведется по области расположения аномальных источников V. Сеточная аппроксимация интегрального уравнения, когда нижнее полупространство разбивается на ячейки конечного объема, позволяет перейти к системе линейных уравнений относительно неизвестных значений функции аномальных источников $\boldsymbol{j_m}$ в узлах сетки, определение которых и является решением задачи по визуализации местоположения в земной коре геоэлектрических неоднородностей с повышенной электропроводностью.

Описание эксперимента по применению радиоголографического метода.

В 2012 году на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района были проведены тестовые работы по исследованию возможностей радиоголографического метода в одночастотном варианте [1]. При интерпретации полученных результатов и при проведении математического моделирования была отмечена возможность появления «ложных» аномалий при голографической реконструкции распределения неоднородностей, обусловленных дискретностью точек измерения электромагнитного поля и ограниченностью площади планшета съемки. В качестве одного из способов по отбраковке таких «ложных» аномалий было предложено проведение наблюдений на нескольких частотах. Поэтому в 2017 году на участке Лойпишнюн были проведены расширенные полевые экспериментальные исследования с целью выяснения возможностей радиоголографического метода в двухчастотном варианте по визуализации в земной коре аномальных областей с повышенной электропроводностью.

Измерения проводились по десяти профилям длиной 900 м, шаг наблюдений и расстояние между профилями составляли 100 м. Таким образом была получена равномерная квадратная сетка пунктов наблюдений, включающая в себя 100 экспериментальных точек. Ориентация сетки в пространстве была выбрана так, чтобы одна из сторон планшета была перпендикулярна простиранию горных пород. Вследствие чего профиля были проложены с юго-востока на северо-запад по азимуту 312^0.

В качестве контролируемого источника электромагнитного поля использовался генератор DDS-3X25 USB с антенной в виде квадратной незаземленной петли с длиной стороны 150 м. Центр петли располагался в 400 м к юго-востоку от края планшета. В петле генерировались гармонические сигналы частотой 34 и 136 Гц. Ток в рамке определялся с помощью измерителя на основе датчика Холла, сила тока в среднем составляла 4–8 А. Для получения фазовых характеристик первичного тока сигнал снимался с маленького участка петли, длиной 1 м, и записывался в систему регистрации и сбора информации с точной привязкой к мировому времени UT с помощью спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Генераторная группа изображена на рис. 1.



Рисунок 1. Генераторная группа

В пунктах наблюдения магнитные компоненты электромагнитного поля от контролируемого источника измерялись трехкомпонентным индукционным магнитометром с широкой полосой пропускания от 0,01 до 200 Гц, представленным на рис. 2. Магнитные датчики ориентировались взаимно ортогонально, ось Y была направлена вдоль профилей. Аналоговые сигналы с магнитных датчиков обрабатывались цифровой системой регистрации и сбора информации, основанной на шестиканальном 22-битном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) с частотой дискретизации 512 Гц [2] и также привязывались к мировому времени UT с помощью спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

Благодаря точной привязке к мировому времени UT измеряемых сигналов и тока использованный комплекс передающей и приемной аппаратуры позволял определять абсолютную разность фаз между компонентами

магнитного поля и током в передающей антенне. Таким образом, кроме значений амплитуд были получены и распределения фазовых характеристик магнитных компонент поля по площади планшета, что является необходимым условием для проведения голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре.



Рисунок 2. Индукционный магнитометр.

Обсуждение результатов эксперимента.

Система линейных уравнений относительно неизвестных значений плотности фиктивного магнитного тока $\boldsymbol{j}_m$ в узлах сетки, полученная в результате сеточной аппроксимации интегрального уравнения (1), решалась стандартным методом Гаусса. Линейный размер кубических ячеек, на которые было разбито нижнее полупространство, составлял 100 м. Для горизонтальной незаземленной петли возбуждение токов в земной коре носит индукционный характер, то есть вихревые токи текут преимущественно субгоризонтально. Вследствие этого для фиктивных магнитных токов наиболее информативной является вертикальная составляющая j_{mz}. На рис. 3 представлены карты изолиний амплитуды вертикальной компоненты плотности магнитного тока j_{mz} для вертикального разреза земной коры XZ при Y = 400 м на частотах 34 Гц и 136 Гц соответственно.

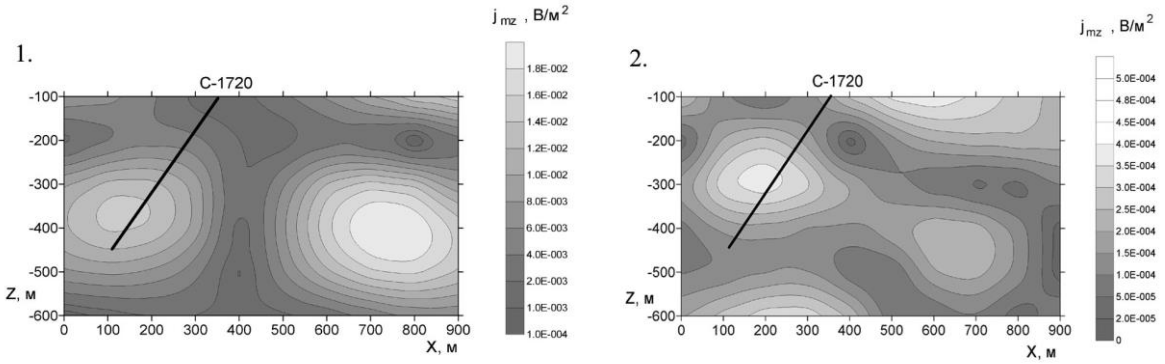


Рисунок 3. Карта изолиний амплитуд вертикальной составляющей плотности фиктивного магнитного тока j_{mz} для вертикального сечения земной коры при Y = 400 м: 1 - на частоте 34 Гц, 2 - на частоте 136 Гц. Черной линией показана проекция ствола буровой скважины С-1720.

Из рис. 3 видно, что для частоты 34 Гц выделяются две аномальные области в пределах координат X = 50–250 м, Z = 300–450 м и X = 600–850 м, Z = 300–530 м, на частоте 136 Гц для этого сечения наблюдается только одна аномальная зона в пределах координат X = 100–300 м, Z = 250–350 м. Первая аномальная область с повышенной электропроводностью имеет геологическое объяснение. В данном районе пробурена глубокая скважина С-1720, длина ствола которой составляет 502.7 м. Скважиной были вскрыты как породы с магматическим, бедно вкрапленным сульфидным оруденением, так и рудные зоны метаморфогенного типа с богатым содержанием сульфидов. Прослои с переотложенным медно-никелевым сульфидным оруденением были встречены в интервалах глубин 218–219 м, 265–270 м, 360–365 м и приурочены, как правило, к зонам тектонических разломов [3]. Если сопоставить эти данные с результатами голографической реконструкции распределения геоэлектрических

неоднородностей в земной коре, то можно заметить, что данная аномальная область с повышенной электропроводностью соответствует местоположению метаморфогенных рудных зон с богатой сульфидной минерализацией. По оси *Y* аномалия прослеживается в пределах координат *Y* = 400–600 м.
Вторую интенсивную аномальную область в пределах координат *X* = 600–850 м, *Z* = 300–530 м, наблюдаемую на рис. 3 для частоты 34 Гц можно расценивать как ложную для данного сечения земной коры, так как на частоте 136 Гц она практически не проявляется.

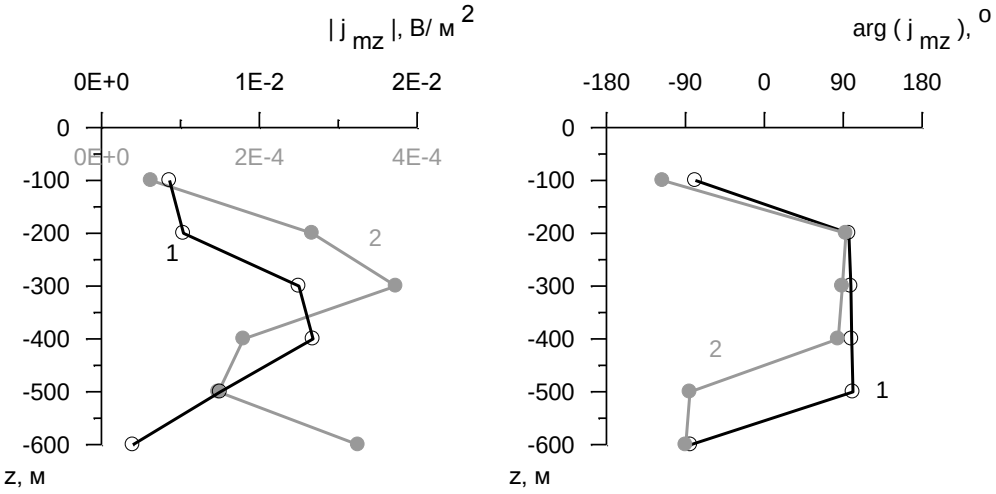


Рисунок 4. Графики зависимости амплитуды и фазы вертикальной составляющей плотности магнитного тока j_{mz} от глубины для точки с координатами *X* = 200 м, *Y* = 400 м: 1 – для частоты 34 Гц; 2 - для частоты 136 Гц.

Дополнительную информацию о распределении геоэлектрических неоднородностей в земной коре может дать анализ фазы вертикальной компоненты плотности фиктивного магнитного тока j_{mz}. На рис. 4 представлены графики зависимости амплитуды и фазы вертикальной составляющей плотности магнитного тока от глубины для точки с координатами *X* = 200 м, *Y* = 400 м. Как видно из рисунка, аномальная область, соответствующая местоположению метаморфогенных рудных зон с богатой сульфидной медно-никелевой минерализацией, выделяется не только максимумами амплитуд, но и резкими скачками фазы на 180^0.

Заключение.

Радиоголографический метод является перспективным инструментом для решения задач рудной геофизики по визуализации в земной коре геоэлектрических неоднородностей. Применение радиоголографического метода позволяет по площадным поверхностным наблюдениям магнитных компонент электромагнитного поля от контролируемого источника эффективно локализовать в среде аномальные области с повышенной электропроводностью, ассоциируемые с локальными рудными телами. Однако для более надежной интерпретации результатов голографической реконструкции распределения неоднородностей в земной коре исследования необходимо проводить в двухчастотном варианте. Сравнение результатов голографической реконструкции на разных частотах позволяет отбраковать «ложные» аномалии и выделить те аномальные зоны, которые можно ассоциировать с рудными телами.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 17-45-510956 р_а).

Литература

1. Любчич В.А. Применение радиоголографического метода при поиске локальных рудных тел. // Физика Земли, №2, 2015, с.139-149
2. Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента, № 3, 2011, с. 73-75.
3. Шолохнев В.В., Поляков И.В. и др. Отчет о результатах поисковых работ на сульфидные медно-никелевые руды и другие полезные ископаемые в зоне контакта Мончеплутона и Мончетундровского массива в 1994-98 гг. (объект Лойпишнюн). Мончегорск. 1998.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 67-70.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.67-70

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ И ТЕРМОСФЕРЫ ДЛЯ МАРТА 2013 ГОДА В ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОМ И ПОЛНОСТЬЮ САМОСОГЛАСОВАННОМ ВАРИАНТАХ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ UAM

А.А. Намгаладзе, С.А. Парфенов, М.А. Князева, О.В. Золотов

Мурманский арктический государственный университет, Мурманск
(e-mail: namgaladze@yandex.ru)

Аннотация. Приводятся результаты численных расчётов параметров ионосферы и термосферы, выполненных с помощью двух версий глобальной модели верхней атмосферы UAM (Upper Atmosphere Model): полуэмпирической UAM-TM и полностью самосогласованной UAM-TT. Выбранный период моделирования (1-9 марта 2013 года) характеризуется тем, что отстоит на 11 лет от исследованного авторами ранее периода (апрель 2002 года). Рассчитанная концентрация электронов на высотах F2-слоя дополнительно сравнивалась с эмпирической моделью IRI-2016. Исследование показало необходимость модификации блока нейтральной атмосферы и нижней ионосферы модели UAM-TT на высотах вблизи границы термосферы и мезосферы.

Abstract. This article presents the results of numerical calculations of the parameters of the ionosphere and thermosphere, performed using two versions of the global model of the upper atmosphere UAM (Upper Atmosphere Model): a semi-empirical UAM-TM and a fully self-consistent UAM-TT. The selected simulation period (March 1–9, 2013) is characterized by the fact that it is 11 years from the period studied by the authors earlier (April 2002). The calculated electron concentration at the heights of the F2 layer was additionally compared with the empirical model IRI-2016. This study shows the need to modify UAM-TT (block of the neutral atmosphere and the lower ionosphere) at altitudes near the boundary of the thermosphere and mesosphere.

Метод исследования

Основным используемым в настоящей работе методом является численное моделирование физических процессов. В качестве инструмента выступает глобальная численная модель верхней атмосферы UAM (Upper Atmosphere Model). Эта модель неоднократно использовалась авторами ранее и показала способность воспроизводить трёхмерные вариации параметров ионосферы и термосферы как для спокойных, так и возмущенных условий во всём диапазоне широт и долгот [1-4]. В настоящей работе используются две версии данной модели:

UAM-TM, полуэмпирическая версия, в которой параметры нейтральной атмосферы (температура и концентрации компонент) берутся из эмпирической модели термосферы NRLMSISE-00 [5], а скорости движения вычисляются из уравнения для ветров с градиентами давления, рассчитанными по температуре и концентрациям из NRLMSISE-00;

UAM-TT, полностью самосогласованная версия, в которой температура, состав нейтральной атмосферы и ветры рассчитаны по теоретическим уравнениям непрерывности, движения и теплового баланса.

Способ задания граничных условий соответствует всем предыдущим расчётам с использованием модели UAM. Начальные условия в обоих случаях задаются «нулевыми» (простейшими аппроксимациями). Шаг интегрирования по времени также одинаков и равняется 1 минуте.

В настоящей работе исследованы вариации параметров ионосферы и термосферы для периода 01.03.2013-09.03.2013. Данный период отстоит на одиннадцать лет от изученного авторами ранее, когда результаты сопоставления наблюдавшихся и рассчитанных параметров показали их хорошее согласие [6].

Период моделирования был преимущественно геомагнитно-спокойным. Индексы солнечной и геомагнитной активностей F10,7, Kp, AE и Dst для него приведены на рисунке 1. Максимальное значение индекса Kp (5,0) наблюдалось 01.03.2013 г. в период времени с 09:00 до 12:00 UT, усреднённое за рассматриваемый период значение составляет 1,6. Минимальное значение индекса Dst за весь рассматриваемый временной отрезок равно –55 нТл, что соответствует слабо-возмущённым условиям. Уровень солнечной активности средний: усреднённое за период значение F10,7 равно $112{,}4 \cdot 10^{-22}$ Вт·м$^{-2}$·Гц$^{-1}$.

На основе рассчитанных модельных результатов построены глобальные карты ряда ионосферных и термосферных параметров на фиксированной высоте (294 км), близкой к высоте главного ионосферного максимума, для момента времени 24UT каждого из моделируемых дней. Для сопоставления рассчитанной

концентрации электронов использовалась эмпирическая модель ионосферы IRI-2016 (International Reference Ionosphere) [7].

Результаты и обсуждение

Характерные результаты моделирования представлены на рисунках 1 и 2 в виде карт в геомагнитной системе координат, на которых пунктирными линиями обозначены географический экватор и положение линии терминатора, кружком – подсолнечная точка.

По данным IRI-2016 в рассмотренный период 1-9 марта 2013 г. распределение электронной концентрации вблизи максимума F2-области ионосферы практически не меняется. На дневной стороне отчётливо видны гребни экваториальной аномалии. В северном геомагнитном полушарии гребень сильнее выражен, чем в южном.

Качественно обе версии модели UAM воспроизводят структуру и динамику F2-области ионосферы. Абсолютные значения электронной концентрации в результатах расчётов по UAM-TM ближе к значениям эмпирической модели IRI-2016, чем значения по UAM-TT, для которой абсолютные значения электронной концентрации сильно занижены глобально, начиная с 03.03.2013. Это занижение составляет около 5 раз ночью, и 2 раз днём.

Широтно-долготные распределения концентраций атомарного кислорода, молекулярных азота и кислорода в единой шкале на высоте 294 км показывают, что по данным NRLMSISE-00 значения незначительно глобально возрастают при переходе от 01.03.2013 к 09.03.2013. Видна асимметрия между геомагнитными полушариями: в южном полушарии значения выше, чем в северном.

Широтно-долготные распределения концентрации атомарного кислорода на высоте 294 км показывают, что по UAM-TT концентрация O к концу первых суток выше значений по NRLMSISE-00, увеличение продолжается до 03.03.2013, далее падает до значений, меньших, чем по NRLMSISE-00.

Анализ концентрации молекулярного азота показывает, что для 01.03.2013 распределения концентрации N_2 по UAM-TT и NRLMSISE-00 близки друг к другу с незначительным завышением значений в самосогласованном варианте. В версии UAM-TT значения возрастают до 04.03.2013, после этой даты падают до значений существенно меньших, чем по NRLMSISE-00.

Широтно-долготные распределения концентрации молекулярного кислорода по самосогласованной версии модели UAM-TT показывают, что концентрация значительно завышена по сравнению с данными NRLMSISE-00. Наибольшее приближение результатов расчетов $n(O_2)$ по UAM-TT к NRLMSISE-00 видно в первые сутки (01.03.2013). Далее по 04.03.2013 значения концентрации молекулярного кислорода возрастают, после 04.03.2013 – уменьшаются до значений, близких к данным NRLMSISE-00.

Возможной причиной качественного расхождения значений электронной концентрации на высотах F2-слоя ионосферы, рассчитанной по моделям UAM-TT и IRI-2016, может являться завышение значений концентрации молекулярного кислорода, так как молекулярный кислород является одним из источников потерь для электронной концентрации в F2-области ионосферы, но обычно его концентрация много ниже концентрации N_2. Нарушение этого различия между $n(N_2)$ и $n(O_2)$ и является, на наш взгляд, главной причиной низких значений электронной концентрации в UAM-TT.

Причинами неточного расчёта концентраций нейтральных составляющих в UAM-TT могут быть: влияние малых нейтральных компонент (например, озона), турбулентный нагрев нейтрального газа, охлаждение нейтрального газа за счёт микроволнового излучения, на данный момент не учитываемые или некорректно учитываемые в модели UAM.

Широтно-долготные распределения температуры нейтрального газа показывают заметное отличие результатов модели UAM-TT от данных NRLMSISE-00 для 1 и 5 марта в сторону более высоких температур при существенном сближении результатов для 9 марта. Одновременно с этим на высотах мезопаузы (около 90 км) наблюдается устойчивое падение температуры нейтрального газа, приводящее в конечном счёте к неустойчивости расчётов.

Заключение

В работе приведены результаты исследования поведения параметров ионосферы и термосферы, рассчитываемых в полностью самосогласованной UAM-TT и полуэмпирической UAM-TM версиях глобальной численной модели UAM для равноденственного периода вблизи аномально слабого максимума 24-го солнечного цикла. Обнаружены несоответствия с аналогичным исследованным ранее периодом 23-го цикла (апрель 2002 года), когда самосогласованная версия модели UAM-TT лучше соответствовала радарным ионосферным наблюдениям, чем UAM-TM. Данное исследование показало необходимость модификации блока нейтральной атмосферы и нижней ионосферы модели UAM в части добавления учёта озона в уравнениях непрерывности для молекулярного и атомарного кислорода и в уравнении теплового баланса для нейтрального газа, а также более корректного описания процессов нагрева и охлаждения в нижней нейтральной атмосфере за счёт турбулентности, поглощения солнечного излучения и микроволнового излучения атмосферы.

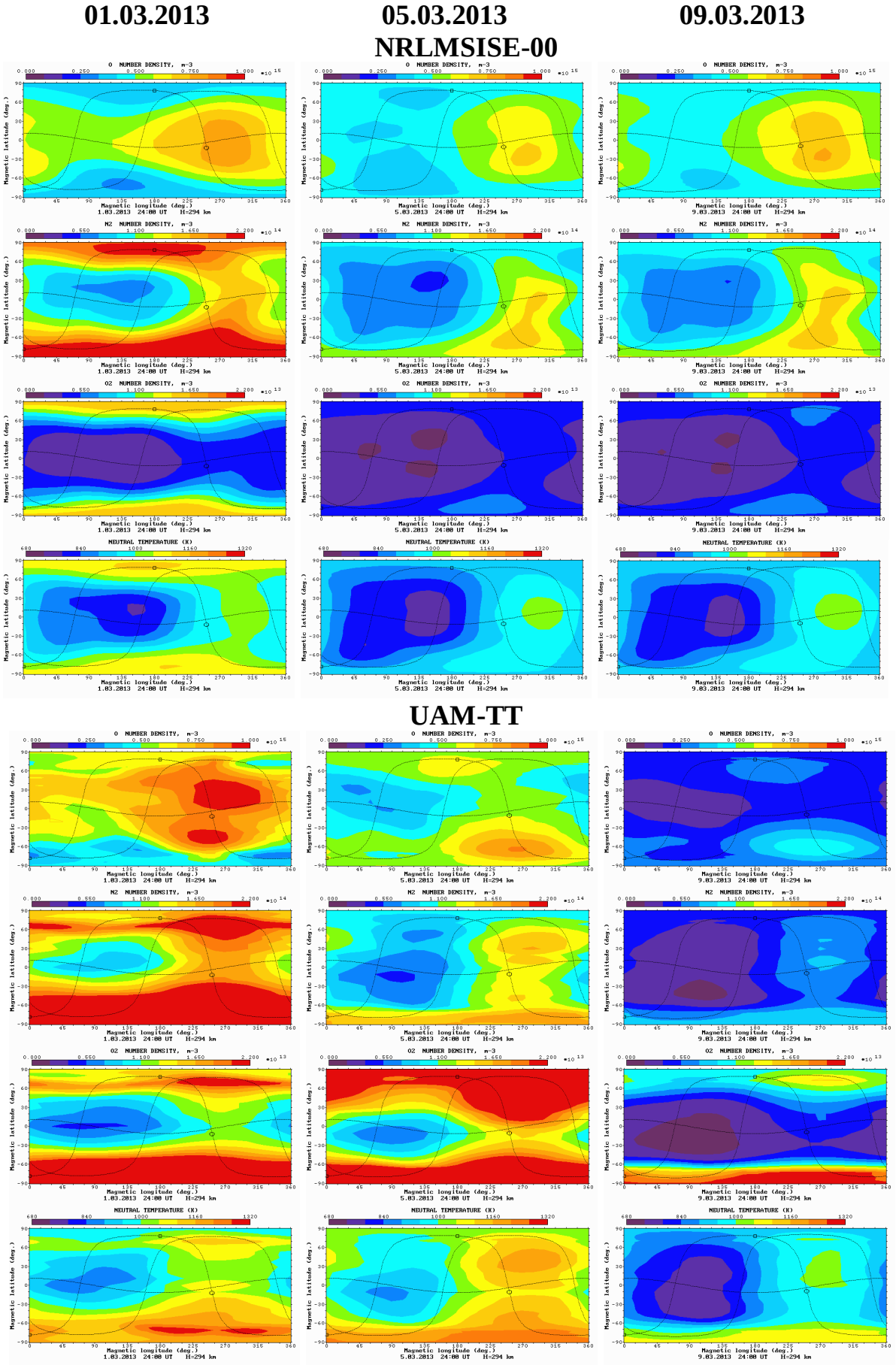


Рисунок 1 – Рассчитанные моделями NRLMSISE-00 и UAM-TT концентрации атомарного кислорода n(O), молекулярных азота $n(N_2)$ и кислорода $n(O_2)$, нейтральная температура Tn на высоте 294 км для 24:00UT 1 марта, 5 марта и 9 марта 2013 г.

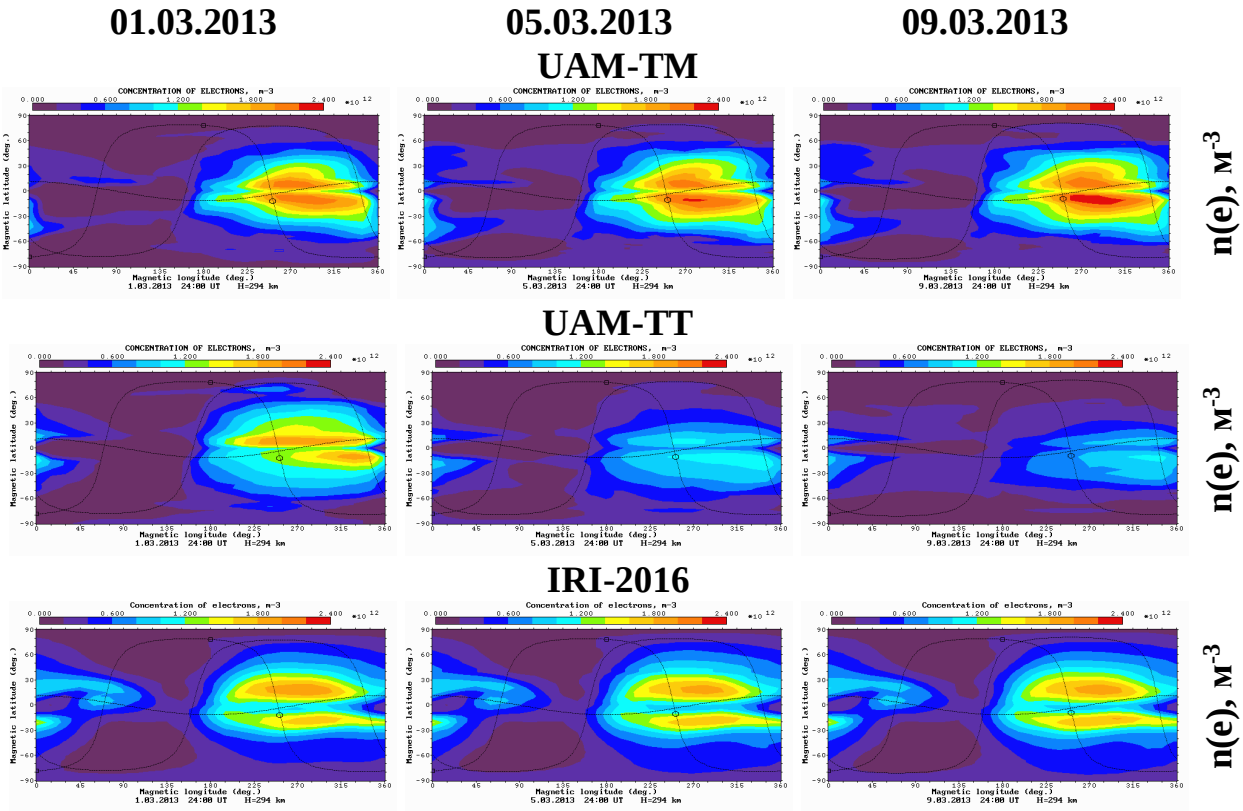


Рисунок 2 – Рассчитанная моделями UAM-TM, UAM-TT и IRI-2016 концентрация электронов n(e) на высоте 294 км для 24:00UT 1 марта, 5 марта и 9 марта 2013 г.

Литература

1. High-latitude ionosphere during magnetic storms of October 26, 2003–November 1, 2003: Tomographic reconstructions and numerical modeling / I.V. Korableva, A.A Namgaladze, A.N. Namgaladze // Geomagnetism and Aeronomy. 2008. 48 (5). P. 642-651.
2. Numerical modeling of solar wind influences on the dynamics of the high-latitude upper atmosphere / M. Förster, B.E. Prokhorov, A.A. Namgaladze, M. Holschneider // Advances in Radio Science. 2012. 10. P. 299-312.
3. Latitudinal Variations and Altitude Profiles of Ionospheric Parameters: Comparison of Theoretical and Empirical Model Results / M.G. Botova, Yu.V. Romanovskaya, A.A. Namgaladze // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2015. 9(5). P. 764-769.
4. Aerosols and seismo-ionosphere coupling: A review / A.A. Namgaladze, M.I. Karpov, M.A. Knyazeva // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. 171. P. 83-93.
5. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues / M. Picone et al. // Journal of Geophysical Research. 2002. 107 (A12). 1468.
6. Modelling of the ionosphere /thermosphere behaviour during the April 2002 magnetic storms: A comparison of the UAM results with the ISR and NRLMSISE -00 data / A.A. Namgaladze et al. // Advances in Space Research. 2006. 37 (2). P.380-391.
7. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions: IRI-2016 / D. Bilitza et al. // Space Weather. 2017. 15. P. 418-429.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, . 71-74
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.71-74

АНАЛИЗ АВРОРАЛЬНОГО ОНЧ ХИССА В ОБС. ЛОВОЗЕРО И ВБЛИЗИ ОБС. СОДАНКЮЛЯ

А.С.Никитенко [1], О.М.Лебедь [1], Ю.В.Федоренко [1], Н.Г.Клейменова [2,3], Ю.Маннинен [4], Л.И.Громова [5], Т Турунен [4].

[1] *Полярный Геофизический институт РАН, Апатиты, Россия,*
[2] *Институт физики Земли РАН, Москва, Россия,*
[3] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия,*
[4] *Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия,*
[5] *ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия*

Аннотация. Разработана методика вычисления положения области выхода ОНЧ волн из ионосферы на основе данных 3-х компонентной цифровой регистрации волн. Проведено опробование предложенного метода к анализу ОНЧ излучений типа аврорального хисса. Выполнен анализ нескольких событий, регистрируемых одновременно в обс. Ловозеро (LOZ) и финской ст. Каннуслехто (KAN, 40 км от обс.Соданкюля), расположенных на близкой широте на расстоянии около 400 км по долготе. Показано, что, как правило, всплески аврорального хисса регистрируются в LOZ и KAN одновременно и связаны с уярчением полярных сияний, наблюдающихся севернее точки ОНЧ наблюдений, однако область ионосферного выхода волн располагается южнее ОНЧ приемников, что объясняется в рамках разработанного метода.

Abstract. The method has been developed for calculating the location of the ionospheric exit region of VLF waves based on the data of the 3-component digital wave registration. The proposed method has been tested for an analysis of the VLF auroral hiss type emissions. The analysis of several VLF events has been performed. The considered VLF events have been simultaneously recorded at Russian Lovozero station (LOZ) and Finnish Kannuslehta station (KAN) located at similar latitude in the longitudinal distance of 400 km. It was found that, as a rule, the auroral hiss bursts occurred simultaneously and associated with visible aurora brightening observed northward from these stations. However, the VLF ionospheric exit region was found to be located southward from the stations. The developed method has been applied to explain this situation.

Материалы и методы

В работе использованы данные регистраторов ОНЧ излучений, расположенных в обс. Ловозеро (LOZ) и финской станции Каннуслехто (KAN, 40 км от обс. Соданкюля). Точки наблюдений находятся на близких L-оболочках и разнесены на 400 километров по широте (рис. 1). Оба регистратора оснащены взаимно ортогональными рамочными антеннами, способными измерять горизонтальные компоненты напряженности магнитного поля. Помимо этого дипольная антенна в Ловозеро позволяет регистрировать вертикальную компоненту электрического поля. Фотография регистратора горизонтальных компонент напряженности магнитного поля и вертикальной компоненты напряженности электрического поля представлена на рисунке 1. Измерение трех компонент поля делает возможным определение обратного азимута вектора Пойнтинга φ_S , т.е. угла прихода излучений в точку наблюдений [Маннинен и др., 2014; Клейменова и др., 2015].

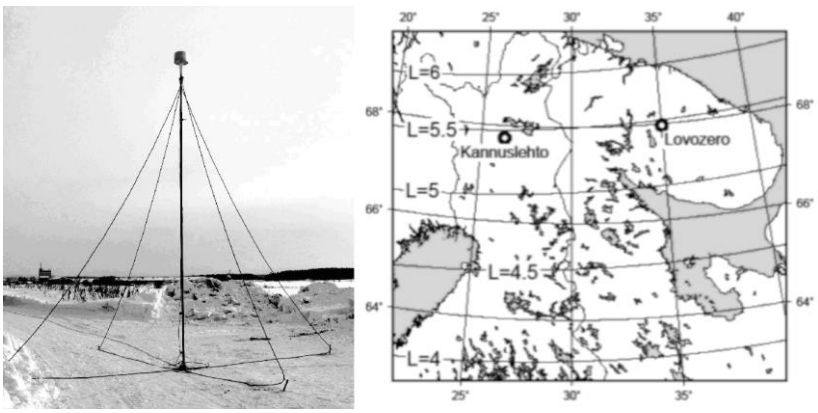


Рис. 1. Слева — регистратор ОНЧ излучений в обс. Ловозеро. Справа — карта расположения станций

Нами была разработана методика вычисления положения области выхода ОНЧ волн из ионосферы на основе вычисления обратного азимута вектора Пойнтинга. Определение направления прихода ОНЧ волн, зарегистрированных в обсерватории Ловозеро, проводилось по данным измерений распределения реальной части распространяющейся энергии электромагнитного поля S от угла φ_S, рассчитанного по реальной части вектора Пойнтинга. У земной поверхности эти параметры определяются, согласно работе [Tsuruda,1979] как:

$$S = \Re(S_x) + \Re(S_y),\ \varphi_s = \arctan 2\left(\frac{\Re(S_y)}{\Re(S_x)}\right)$$

Здесь $S = -H_y E_z^*,\ S_y = H_x E_z^*$ - горизонтальные компоненты вектора Пойнтинга, H_x, H_y - северная и восточная горизонтальные компоненты магнитного поля, полученные после фильтрации и применения преобразования Гильберта, E_z - вертикальная компонента электрического поля, символ $\Re$ означает взятие реальной части, звездочкой обозначено комплексное сопряжение.

Предложенный метод был применен к анализу ОНЧ излучений типа аврорального хисса, зарегистрированных одновременно в Ловозеро (LOZ) и Каннуслехто (KAN). Помимо ОНЧ наблюдений в настоящей работе использованы также результаты наблюдений полярных сияний, проводимых в этих пунктах.

Для детального исследования положения области выхода волн ОНЧ хиссов из ионосферы записи компонент поля, зарегистрированных в LOZ, были подвергнуты фильтрации гауссовым полосовым FIR-фильтром с центральной частотой $f_c = 8500$ Гц, расположенной в окрестности максимума интенсивности хиссов, и шириной полосы $\delta f = 20$ Гц

Для расчета распределения энергии по углам выбирались интервалы записи, во время которых наблюдались ОНЧ всплески с большим отношением сигнал/шум. Для каждого отсчета данных из интервала рассчитывались значения энергии S и угла прихода φ_S. При построении распределений диапазон всех возможных углов прихода (0 - 360 градусов) был разбит на равные сектора. Затем рассчитывалось среднее значение энергии, приходящей из каждого сектора в точку наблюдений. Результаты представлялись в виде графика зависимости S от φ_S в полярных координатах.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты расчета в разные моменты времени распределения энергии аврорального ОНЧ хисса, зарегистрированного в обсерватории Ловозеро 22 января 2016 года в период 19:27 - 19:33 UT. Как следует из рисунков, значения угла прихода выделенных всплесков в разные моменты времени меняются, что позволяет отслеживать динамику положения области выхода авроральных ОНЧ хиссов. Кроме того, стоит отметить, что во время регистрации рассматриваемых излучений на небе наблюдалась дуга полярных сияний. При этом распределения энергии по углам прихода указывают на то, что область выхода во всех случаях находилась к югу от Ловозеро.

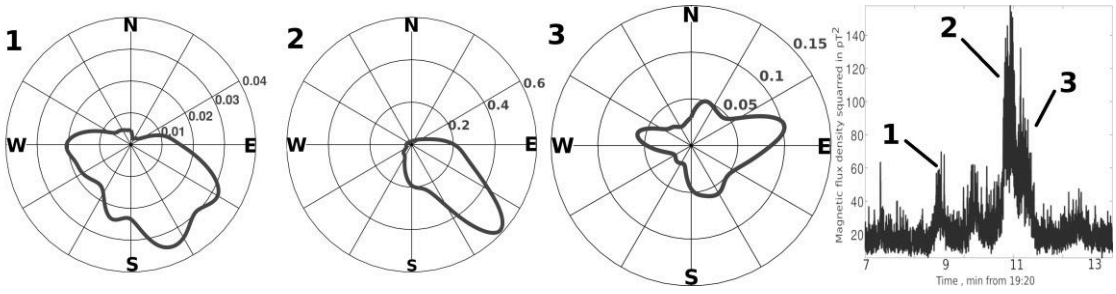


Рис. 2: Распределения энергии от угла прихода авроральных ОНЧ хиссов, зарегистрированных в LOZ 16 января 2016 г. в 19.27-19.33 UT

Для исследования пространственной структуры авроральных ОНЧ излучений и связи их возникновения с возникновением дуги полярных сияний были привлечены данные электромагнитных наблюдений обсерватории Соданкюля. Как показали результаты наблюдений, большинство авроральных хиссов наблюдаются одновременно в обеих точках наблюдения.

Рассмотрим случай одновременной регистрации авроральных хиссов в LOZ и KAN 23 декабря 2016 года 17:00 - 18:00 UT. Излучения наблюдались во время восстановительной фазы суббури в отсутствии сильных возмущений (данные не приведены). На рисунке 3 представлены огибающие магнитного поля, рассчитанные по данным обеих станций, а также распределения энергии по углам прихода для трех выделенных всплесков.

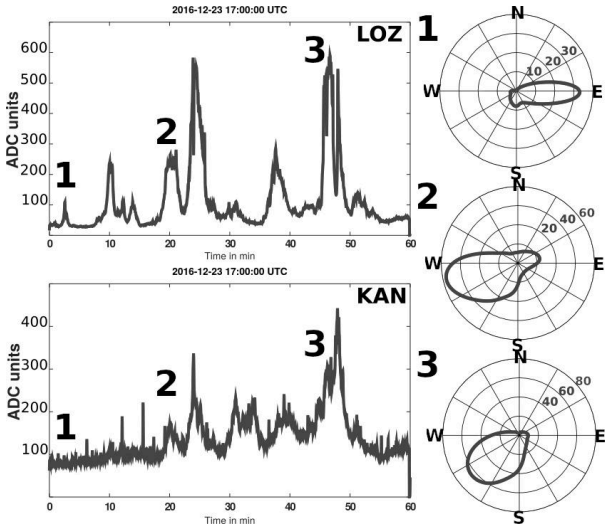


Рис. 3: Слева - огибающие амплитуды магнитного поля авроральных хиссов, зарегистрированных в обс. Ловозеро и обс. Каннуслухто 23 декабря 2016 года 17 — 18 UT. Справа - распределения энергии излучений по углам прихода для выделенных всплесков.

Всплеск №1 наблюдается только в LOZ. Распределение мощности по углам прихода достаточно «узкое» и указывает на восток. Это свидетельствует о том, что область выхода находится далеко на востоке. В этот момент в KAN излучения не наблюдаются, из чего можно сделать вывод, что область выхода локальна. Распределение энергии по углам прихода для всплеска №2 имеет вид области, вытянутой в юго-западном направлении. В этот момент ОНЧ излучения также наблюдаются и в KAN. Такая картина может быть результатом существования в ионосфере вытянутой по долготе области выхода, причем она находится достаточно близко к обеим станциям. Область выхода всплеска №3 находится также к юго-западу от Ловозеро. Этот всплеск также наблюдается в обеих точках наблюдений.

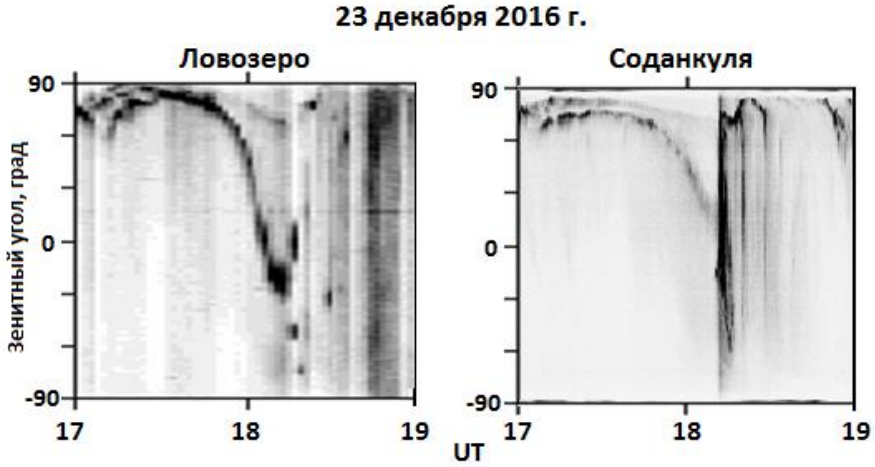


Рис. 4: Кеограммы полярных сияний по данным обс. Ловозеро и обс. Соданкюля

Согласно данным кеограмм полярных сияний для KAN и LOZ в период с 17:00 до 17:40 дуга полярных сияний находится к северу от точек наблюдений. В этот время положения областей выхода авроральных хиссов практически не меняются по широте. Начиная с 17:40 UT, дуга начинает смещаться в южном направлении. Вместе с этим всплески аврорального хисса начинают приходить в точки наблюдений с более низких широт.

Как следует из результатов моделирования [Лебедь и др., 2018], наблюдаемая картина может быть результатом особенностей недактового распространения авроральных хиссов в ионосфере. Частицы, вызывающие полярные сияния, распространяются вдоль силовой линии и высыпаются севернее точки наблюдений. При этом траектории распространения электромагнитных волн на частотах 8-10 кГц отклоняются к югу.

Заключение

1. Разработана методика вычисления положения области выхода ОНЧ волн из ионосферы на основе данных 3-х компонентной цифровой регистрации волн. Предложен метод вычисления обратного азимута вектора Пойнтинга.
2. Выполнен анализ нескольких событий, регистрируемых одновременно в обс. Ловозеро (LOZ) и финской ст. Каннуслехто (KAN, 40 км от обс. Соданкюля), расположенных на близкой широте на расстоянии около 400 км по долготе.
3. Показано, что для рассмотренных случаев регистрации авроральных ОНЧ хиссов область выхода локальна. Вероятность наблюдения ОНЧ всплесков в LOZ или KAN зависит от взаимного расположения области выхода и точки наблюдений. Если излучения наблюдаются только в LOZ, это может быть результатом того, что область выхода находится восточнее точки наблюдений.
4. Во всех рассмотренных случаях одновременной регистрации полярных сияний и авроральных хиссов область выхода излучений находится южнее сияний. Это может быть результатом недактового распространения излучений сквозь магнитосферу и ионосферу к земной поверхности.

Литература

1. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Никитенко А.С. Моделирование прохождения аврорального хисса к земной поверхности. Настоящий сборник.
2. Tsuruda, K., and K. Hayashi, Direction finding technique for elliptically polarized VLF electromagnetic waves and its application to the low-latitude whistlers, J. Atmos. Terr. Phys., 37, 1193, 1975.
3. Маннинен Ю., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Никитенко А.С. Первые результаты одновременной регистрации ОНЧ излучений в двух близко расположенных пунктах в авроральных широтах // Геомагнетизм и Аэрономия том 54, № 1, с. 36. 2014.
4. Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.И., Турунен Т., Федоренко Ю.В., Никитенко А.С., Зелинский Н.Р., Громов С.В. Условия в солнечном ветре и магнитосфере во время всплеска нетипичных онч шипений (08 декабря 2013 г.) // Геомагнетизм и Аэрономия том 55, № 3, с. 323. 2015.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 75-77.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.75-77

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ПЭС ИОНОСФЕРЫ НАД СЕЙСМОАКТИВНЫМИ РЕГИОНАМИ

Е.В Пархимович.[1] Ю.В Романовская.[2] О.В. Золотов[3]

[1] *ФГБОУ ВО «МГТУ», Морской институт, Мурманск*
[2]*ФГБОУ ВО «МГТУ», кафедра Математики, информационных систем и программного обеспечения, Мурманск*
[3]*ФГБОУ ВО «МАГУ», Научно-исследовательская лаборатория «Компьютерное моделирование физических процессов в околоземной среде», Мурманск*
(zolotovo@gmail.com)

Аннотация. В работе представлено программное средство компьютерного анализа полного электронного содержания ионосферы Земли в периоды подготовки сильных сейсмических событий. Обосновано его использование для больших объемов данных для поиска закономерностей появления аномальных вариаций ионосферы и определения критериев для идентификации таких вариаций как так называемые ионосферные предвестники землетрясений.

Работа относится к циклу исследований полного электронного содержания (ПЭС) Земли, направленных на выявление и анализ характеристик возмущений ПЭС, ассоциируемых с процессами подготовки сильных сейсмических событий. В ряде научных публикаций, посвященных анализу ионосферных вариаций, установлено, что перед сильными землетрясениями концентрация электронов в ионосфере изменяется (как правило, увеличивается) в околоэпицентральной области. Однако до сих пор нет общепризнанного объяснения механизма возникновения таких возмущений ионосферы.

Анализ данных полного электронного содержаниия ионосферы (Total Electron Content, TEC) позволит исследовать морфологические закономерности появления аномальных вариаций ионосферы для большого числа сейсмических событий, связанных с процессами подготовки сильных землетрясений.

Аналитическая обработка наблюдений за полным электронным содержанием ионосферы является достаточно трудоемким процессом. В большинстве работ исследователи ограничиваются изучением отдельного взятого землетрясения и поведением ионосферы перед ним. Большой интерес представляет изучение возмущений ионосферы перед множеством различных сильных сейсмических событий, происходивших в разных регионах. Однако такое исследование представляется трудновыполнимым без хотя бы частичной автоматизации. Поэтому нами была поставлена задача разработки программного средства для компьютерного анализа двумерных карт распределений полного электронного содержания ионосферы с целью выявления аномальных возмущений ионосферы в периоды подготовки сильных сейсмических событий.

В большинстве исследовательских работ по данной теме рассматривается конкретное землетрясение или конкретный метод анализа возмущений. Также практически никто из исследователей не исследовал влияние метода определения фоновой вариации ионосферы на связь с сейсмо-ассоциативными признаками и не анализировал возмущения в пространстве, ограничиваясь рассмотрением их эволюции во времени для конкретной фиксированной точки пространства (чаще всего – ближайшей к эпицентру). А также ни одна опубликованная работа не использует поставляемые вместе с картами ПЭС карты среднеквадратического отклонения для определения уровня естественной изменчивости данных. Нами было создано программное средство, позволяющее исследователю проводить анализ данных наблюдений полного электронного содержания ионосферы с учетом оценок среднеквадратичного отклонения данного параметра для любого количества сейсмических событий, а также осуществляющее автоматизированный поиск аномальных локальных возмущений ионосферы, которые могут быть связаны с сейсмической активностью. При этом под аномальными возмущениями полного электронного содержания ионосферы, ассоциируемыми с процессами подготовки сильных землетрясений, мы будем принимать, в соответствии с исследованиями [1], области отклонений полного электронного содержания от фоновых значений, обладающие следующими свойствами:

1) крупный масштаб (> 1 000 км вдоль меридиана и > 1 500 км вдоль параллели), локализация в околоэпицентральной и магнитосопряженной к ней областях;
2) время жизни > 4-6 ч;
3) проявление преимущественно в ночное время с приходом вечернего терминатора и ослабление вплоть до полного исчезновения с приходом утреннего терминатора и подсолнечной точки.

Следует отметить, что в настоящее время в научном сообществе не существует какого-либо общепринятого метода определения фоновой вариации в целях выявления сейсмо-ионосферных предвестников землетрясений. В работах описаны следующие подходы к расчету фоновой вариации:

- как скользящее среднее для 7, 15, 27, 30 дней [2];
- с помощью эмпирических моделей;
- как вариация в ближайший геомагнитно спокойный день [3].

В результате работы было создано программное средство (ПС) для компьютерного анализа и интерпретации данных полного электронного содержания ионосферы с целью выявления аномальных вариаций ионосферы, наблюдавшихся перед сильными землетрясениями.

Ниже перечислены его основные возможности созданного программного средства.

1. Загрузка данных в формате IONEX для заданного периода исследования.
2. Вычисление фоновой вариации как скользящего среднего с возможностью задания различных параметров расчета.
3. Вычисление возмущений (отклонений значения полного электронного содержания от фоновой вариации), с возможностью задания метода расчета.
4. Визуализация рассчитанных данных в виде серии карт, где значения представлены с помощью цвета, с возможностью манипулирования параметрами отрисовки.
5. Трансформация системы координат (из географической в геомагнитную).
6. Экспорт загруженных и рассчитанных данных в текстовые файлы в трехколоночном формате, пригодном для работы в других программных средствах.
7. Сохранение полученного при визуализации изображения.
8. Автоматический поиск аномальных вариаций ионосферы, удовлетворяющих заданным параметрам.

Данное программное средство было разработано в среде Microsoft Visual Studio на языке C#, и включает в себя 9 различных окон, а его код содержит около 4х с половиной тысяч строк кода. Оно не требует установки собственной установки и установки других программных продуктов, что делает его легко переносимым из одной среды в другую.

Созданное программное средство позволяет исследовать сразу несколько методов по выявлению ионосферных предвестников землетрясений, используя в расчетах, кроме карт полного электронного содержания, также карты среднеквадратичного отклонения. Кроме того, в нем реализована возможность автоматического поиска предвестников по заданным параметрам поиска, что позволяет, манипулируя параметрами, подбирать наиболее точные из них. Стоит отметить, что при поиске программное средство анализирует не только точечные данные, но и пространственные характеристики возмущений ПЭС, в отличие от других программ, исследующих полное электронное содержание ионосферы в конкретной точке. Также программное средство обладает блоком визуализации, что позволяет сразу после выполнения вычислений получать визуальное представление об анализируемых данных.

С помощью созданного ПС проведен ряд опытов, в результате которых были сделаны следующие выводы.

1. ПС позволяет воспроизвести результаты (серию карт), полученные ранее нашей научной группой.
2. Функция автоматического поиска работает верно, так как полученные в результате поиска возмущенные точки, действительно, удовлетворяют параметрам поиска, в чем можно убедиться, просмотрев визуализацию соответствующих карт. Далее необходимо еще будет провести серию исследований, чтобы уточнить параметры поиска.
3. Использование большего окна сглаживания (7 или 15 дней) позволяет получать более заметные области локальных возмущений ПЭС, чем при использовании меньшего окна (3 или 5 дней).

Также было проведено исследование по сравнению результатов, полученных с использованием различных формул расчета возмущений.

На Рисунках 1-3 представлены основные экранные формы разработанного программного средства.

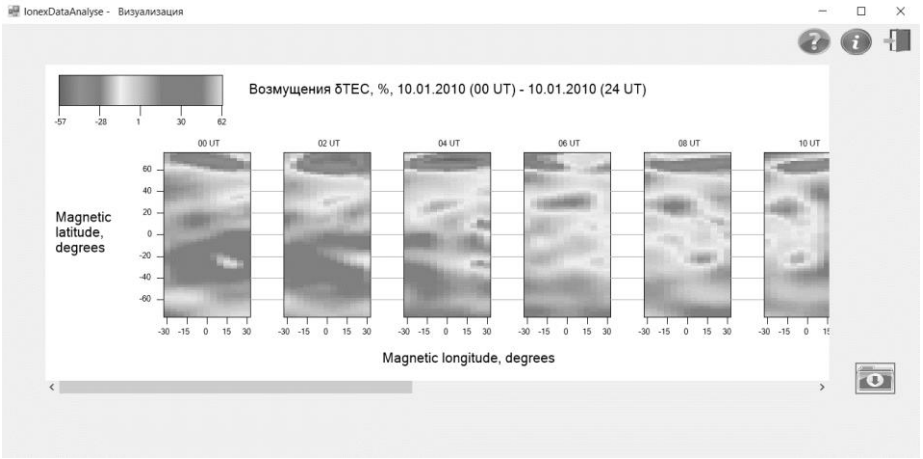


Рисунок 1. Окно «Визуализация»

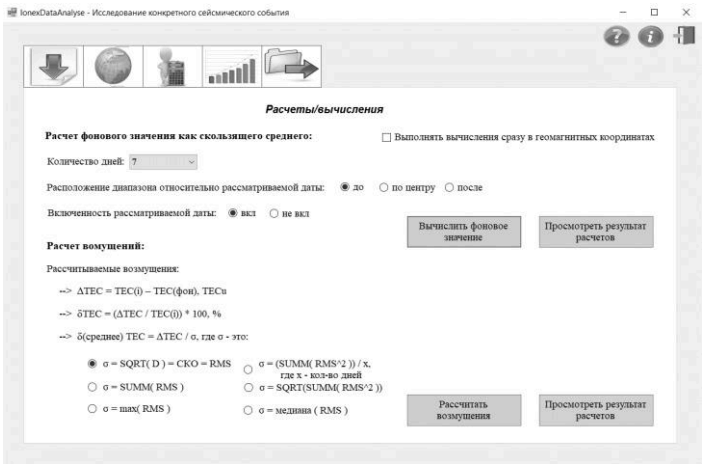


Рисунок 2. Окно «Исследование» – Вкладка «Расчеты»

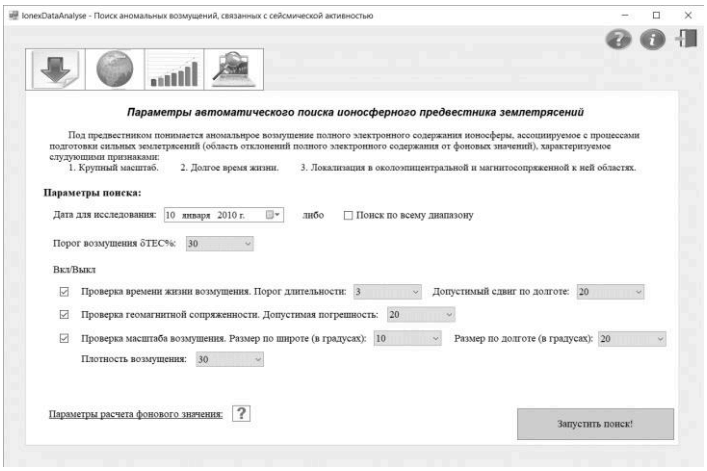


Рисунок 3. Окно «Исследование» – Вкладка «Автоматический поиск предвестников землетрясений»

Разработанное программное средство планируется использовать для компьютерного анализа данных наблюдений за полным электронным содержанием ионосферы в целях выявления аномальных ионосферных возмущений в периоды подготовки сильных землетрясений. Такой анализ является необходимым шагом на пути выявления характерных особенностей поведения ионосферы, связанных с процессами подготовки сильных сейсмических событий, а также объяснения физического механизма появления ионосферного отклика на процессы подготовки сильных землетрясений.

Литература

1. Романовская Ю. В., Намгаладзе А. А. Ионосферные предвестники землетрясений: анализ измерений полного электронного содержания перед сильными сейсмическими событиями 2005 года // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 403–410.
2. Liu J. Y., Chuo Y. J., Shan S. J., Tsai Y. B., Chen Y. I., Pulinets S. A., Yu S. B. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements // Annales Geophysicae. 2004. V. 22, N 5. P. 1585–1593. doi: 10.5194/angeo-22-1585-2004.
3. Zakharenkova I. E., Krankowski A., Shagimuratov I. I. Modification of the low-latitude ionosphere before the 26 December 2004 Indonesian earthquake // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2006. V. 6 (5). P. 817–823. doi: 10.5194/nhess-6-817-2006.
.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 78-80.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.78-80

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОЙ КОМПОНЕНТЫ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА МАСШТАБ ВОЗМУЩЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Ю.В. Платов [1], С.А. Черноус [2]

[1] *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Троицк (yplatov@ mail.ru)*
[2] *Полярный геофизический институт РАН, Апатиты (chernouss@pgia.ru)*

Работа ракетных двигателей сопровождается выбросом в окружающую среду газов, плазмы и дисперсных частиц, содержащихся в продуктах сгорания. Состав, структура и форма образующихся при этом искусственных облаков зависит от типа ракет, режима работы двигателя высоты над поверхностью Земли и ряда других параметров. Наличие дисперсной компоненты в продуктах сгорания двигателей приводит к быстрому переносу возмущений в верхней атмосфере на высотах более 300 км на большие расстояния от места работы двигательных установок.

Введение

Взаимодействие компонент искусственных газо-пылевых облаков окружающей атмосферой приводит к изменению химического состава, направлению и скорости ионно-молекулярных реакций. В многочисленных работах подробно исследованы эффекты, связанные с воздействием запусков мощных ракет на ионосферу Земли (образование «ионосферных дыр»), генерацией длинно-периодных волновых возмущений, развитие оптических явлений в верхней атмосфере [1].

Результаты наблюдений оптических явлений показывают, что основным механизмом свечения газо-пылевых облаков является рассеяние солнечного света на достаточно крупных (дисперсных) частицах в сумеречных условиях.

Наличие дисперсной компоненты в продуктах сгорания ракетных двигателей подтверждается как непосредственными наблюдениями с применениями лидарного зондирования и спектральной аппаратуры, так и путем численного моделирования процесса конденсации продуктов сгорания в выхлопной струе двигателей [2 – 6].

Исследование динамики газо-пылевых облаков, образующихся при запусках твердотопливных ракет показало, что их разлет в верхней атмосфере происходит практически без торможения, что возможно только в случае наличия в составе облака достаточно крупных, тяжелых частиц слабо взаимодействующих с молекулярной компонентой атмосферы [7, 8].

Поэтому представляется интересным оценить степень влияния размеров и массы дисперсных частиц на скорость и масштаб разлета газо-пылевых облаков, образующихся в верхней атмосфере при работе ракетных двигателей

Модель и оценки

При релеевском рассеянии (размер рассевающих частиц значительно меньше длины волны света) зависимость интенсивности рассеянного света от параметров рассеивающего комплекса определяется выражением

$$I = I_0 k \frac{N v^2}{r^2 \lambda^4} (1 + \cos^2 \Theta) = I_0 \, k \, \frac{M \, v}{r^2 \lambda^4 \rho} (1 + \cos^2 \Theta)$$

Здесь: I_0 - интенсивность падающего излучения; k - константа, зависящая от свойств рассеивающего вещества (k ~10); N - число рассеивающих центров; v - объем рассеивающих частиц; r - расстояние до наблюдателя; λ- длина волны; ρ - плотность вещества частиц; Θ - угол рассеяния; M – полная масса вещества.

Зависимость интенсивности рассеянного света от размера частиц очень сильная (I ~ третьей степени (!) характерного размера частиц) поэтому очевидно, что определяющим фактором в яркости и структуре газо-пылевых облаков является наличие в их составе дисперсной компоненты.

Оценим теперь влияние дисперсных частиц на изменение геометрических характеристик таких облаков. Их динамика определяется в основном двумя факторами: газо-динамическим торможением расширяющегося облака и гравитационными силами. Учет воздействие силы тяжести сводится в простом случае к определению характера движения центра массы облака.

Оценим силу газодинамического торможения дисперсной частицы при движении в верхней атмосфере. Изменение импульса частицы за время dt составляет:

$dp = m\,dV = 4/3\,\pi\,r^3\,\rho_0\,dV$ – для частицы

$dp = \pi\,r^2\,\rho_1\,V\,Vdt = \pi\,r^2\,\rho_1\,V^2dt$ – для «захваченного» вещества.

Изменение скорости частицы в результате аэродинамического торможения описывается уравнением:

$4/3\,(dV/V^2)\,(r\,\rho_0/\rho_1) = dt$

Его решение - $t + \tau = 4/3\,1/V(t)\,(r\,\rho_0/\rho_1)$, где $\tau = 4/3\,1/V(0)\,(r\,\rho_0/\rho_1)$

Или $V(t) = 4/3\,(r\,\rho_0/\rho_1)\,1/(t + \tau);$

Расстояние, пройденное частицей за время t

$L(t) = 4/3\,(r\,\rho_0/\rho_1)\,\ln\{t + 4/3\,1/V(0)\,(r\,\rho_0/\rho_1)\}$

Обозначим $k = 43\,4/3\,(r\,\rho_0/\rho_1)$, тогда:

$V(t) = k/[t + k/V(0)];$ и $L(t) = k\,\ln[V(0)\,t/k + 1];$

Время уменьшения скорости в два раза $t_{1/2} = k/V(0)$, а расстояние, которое пройдет частица за это время $L_{1/2} = k\,\ln[2]$ (время и расстояние полуторможения)

На рис. 1 приведена зависимость плотности атмосферы (кг м$^{-3}$) от высоты по данным [9].

На рис.2 в качестве примера приведены зависимости от времени скорости, а на рис. 3 расстояния смещения дисперсных частиц с характерным размером 0.1 мкм при движении на высотах ~ 250, 350 и 500 км.

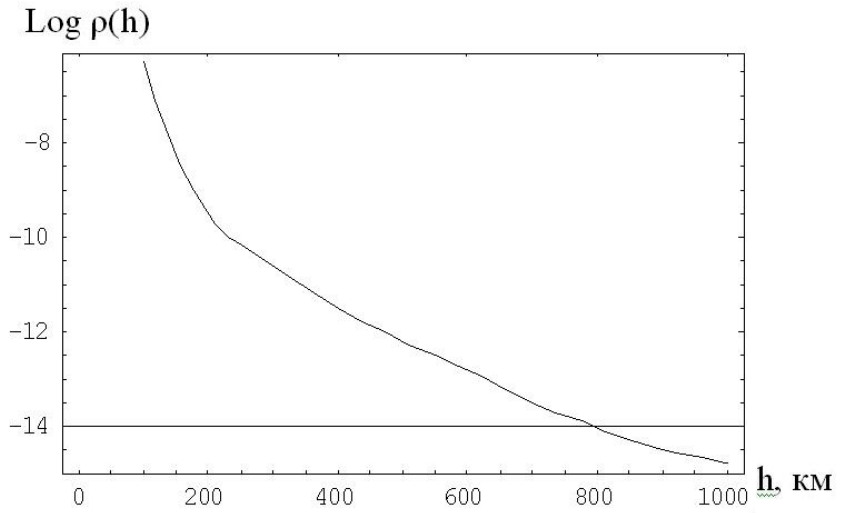


Рис. 1. Изменение плотности атмосферы с высотой.

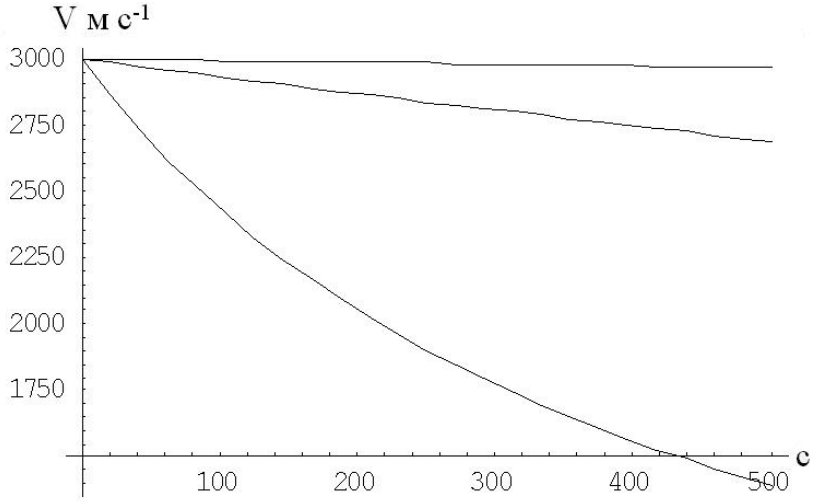


Рис. 2. Изменение скорости частицы размером 0.1 мкм и плотностью 10 ^{3} кг м$^{-3}$ движущейся на высоте 250, 350 и 500 км.

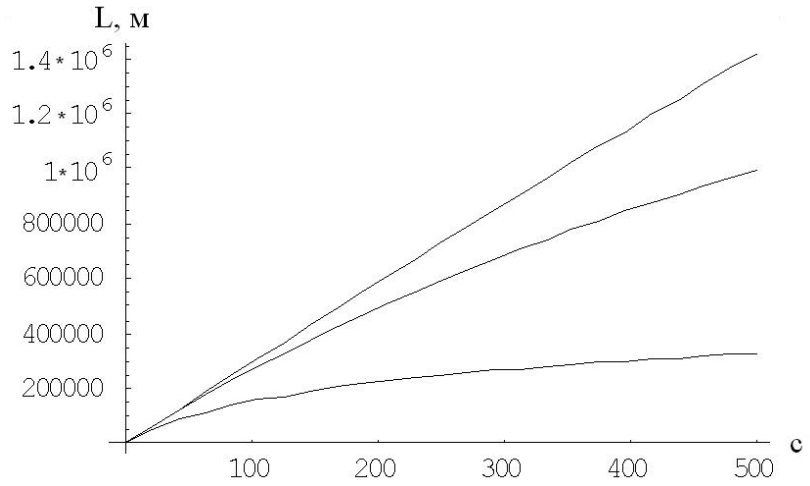


Рис. 3. Зависимость от времени расстояния, пройденного частицей с начальной скоростью 3000 м с-1 на высоте h = 250, 350 и 500 км.

Полученные данные показывают, что крупные частицы с размерами ~ 1 мкм движутся в верхней атмосфере практически без торможения даже на относительно небольших высотах (< 200 км). Выше ~ 350 км торможения при разлете не испытывают даже частицы с размерами ~ 0.01 мкм образующиеся в результате конденсации водяных паров в выхлопной струе ракетных двигателей.

Литература

1. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду, под редакцией В.В.Адушкина, С.И.Козлова и М.В.Сильникова. М. ГЕОС. 2016.

2. *Fricke K.H., Muller K.P., Langer M., Romke., Lubken F.G.,* Visual and lidar observations of rocket induced effects in the upper atmosphere above Andoya on January 25 1995. Proceeding of the 12 th ESA Symposium on Europe. Rocket and Balloons Programs, Norway, 29 May – 1 June 1995, P. 70-76.

3. *Wu J.C.* Possible water vapor condensation in rocket exhaust plumes // AIAA Journal. Vol. 13. № 6. P. 797-802. 1975.

4. *Y.V. Platov, S.A. Chernouss, M.J. Kosch*., Classification of Gas-Dust Formations from Rocket Exhaust in the Upper Atmosphere, Journal of Spacecraft and Rockets, V. 41, N. 4 (July 01, 2004), P. 667-670.

5. *Ю.В. Платов, В.В. Алпатов, В.Ю. Клюшников,* Конденсация паров воды и углекислого газа в выхлопной струе ракетных двигателей. I.Модельный расчет физических условий в выхлопной струе, Геомагнетизм и аэрономия, Т. 54, № 1, С. 106-110, 2014.

6. *Ю.В. Платов, А.И. Семенов, Б.П.Филиппов,* Конденсация паров воды и углекислого газа в выхлопной струе ракетных двигателей. II. Гетерогенная конденсация продуктов сгорания геомагнетизм и аэрономия, т. 54, № 1, с. 111-115, 2014.

7. *Ю. В. Платов, с. А. Черноус, в. В. Алпатов*, особенности оптических явлений, связанных с запусками твердотопливных баллистических ракет, геомагнетизм и аэрономия, том 53, № 1, с. 209–214, 2013

8. *V.R.Tagirov, V.A.Arinin, U.Brandstrom, A.Pajunpaa, V.V.Klimenko.* Atmospheric Optical Phenomena Caused by Powerful Rocket Launches. Journal of spacecraft and rockets. 37 (6) (2000) 812-821.

9. *К.У.Аллен,* Астрофизические величины. Мир. М.: 1977.

« «Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 81-84.
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.81-84

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ И АТМОСФЕРНЫХ ТРАНЗИЕНТОВ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ В МУЛЬТИ-СПУТНИКОВОМ ПРОЕКТЕ МГУ «УНИВЕРСАТ-СОКРАТ».

С.И. Свертилов[1,2], М.И. Панасюк[1,2], А.А.Белов[1,2], А.В. Богомолов[1], В.В. Богомолов[1,2], Г.К Гарипов[1], Е.С. Горбовской[3], А.Ф, Июдин[1], М.А. Казначеева[1,2], В.В.Калегаев[1], П.А. Климов[1], В.М. Липунов[1,3], И.А. Максимов[1], А.В. Минаев[1], В.И. Оседло[1], М.В. Подзолко[1], В.Л. Петров[1], И.А. Рубинштейн[1], К.Ю. Салеев[1,2], В.И. Тулупов[1], Я.А. Штундер[1,2], И.В. Яшин[1]

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга

Аннотация. Одним из ключевых аспектов освоения Арктики является комплексное изучение физических явлений в полярных областях атмосферы Земли и околоземного космического пространства, включая мониторинг космической радиации и наблюдения атмосферных электромагнитных транзиентов.Для этого необходимы совместные наблюдения потоков энергичных частиц и высотных электромагнитных разрядов, в том числе в арктическом регионе, в ходе наземных и космических экспериментов. В рамках этого подхода предполагается разработка однотипного оборудования, которое должно размещаться на космических аппаратах, выводимых на полярные орбиты, а также на сети наземных станций, расположенных вдоль магнитного меридиана. В качестве космического сегмента данного проекта предполагается использовать аппаратуру мульти-спутникового эксперимента МГУ «Универсат-СОКРАТ», в ходе реализации которого предполагается в режиме, близком к реальному времени, определять радиационную обстановку в значительной части области захваченной радиации, осуществлять мониторинг «космического мусора» и электромагнитных транзиентов в верхней атмосфере.

Abstract. One of the key aspects of the development of the Arctic is a comprehensive study of physical phenomena in the polar regions of the Earth's atmosphere and near-Earth space, including the monitoring of space radiation and the observation of atmospheric electromagnetic transients. This requires joint observations of the fluxes of energetic particles and high-altitude electromagnetic discharges, including in the Arctic region, during ground-based and space experiments. In the framework of this approach, it is proposed to develop equipment of the same type, which should be placed on spacecraft being placed on polar orbits, as well as on networks of ground stations located along the magnetic meridian. As a space segment of this project, it is supposed to use the instruments of the multi-satellite experiment Universat-SOCRAT of the Moscow State University, during the implementation of which it is supposed to determine the radiation environment in a significant part of the captured radiation area, to monitor the space debris and electromagnetic transients in the upper atmosphere.

Введение

Одним из ключевых аспектов освоения Арктики является комплексное изучение физических явлений в полярных областях атмосферы Земли и околоземного космического пространства. Глобальная электрическая цепь – один из основных факторов, влияющих на условия функционирования различных техногенных процессов и структур, включая радиосвязь, зависящую от условий распространения электромагнитных волн в атмосфере и ионосфере, линии электропередач, коммуникационные системы (железные дороги, трубопроводы и т.п.). Благодаря особенностям топологии магнитного поля Земли, в полярных областях создаются благоприятные условия для проникновения на относительно малые высоты высокоэнергичных излучений различной природы, в том числе частиц галактических и солнечных космических лучей, высыпающихся магнитосферных электронов. Эти излучения могут вносить в атмосферу Земли значительный электрический заряд и тем самым оказывать существенное воздействие на электромагнитные процессы в атмосфере, активным образом возмущая глобальную электрическую цепь. В последнее время в результате наблюдений, выполненных на спутниках «Вернов» и «Ломоносов», в полярных областях атмосферы были обнаружены интенсивные вспышки электромагнитного излучения, т.н. транзиенты, в том числе в ультрафиолетовом и гамма диапазонах. Природа этих явлений пока достоверно не известно, однако не исключено, что они связаны с мощными электрическими разрядами и, таким образом, также могут рассматриваться, как один из важных факторов, влияющих на глобальную электрическую цепь. Таким

образом, в целях обеспечения эффективной эксплуатации различных технических систем в ходе освоения арктических регионов представляется целесообразным осуществлять комплексное исследование электромагнитных явлений в атмосфере Земли и околоземном пространстве, включая мониторинг космической радиации и наблюдения атмосферных электромагнитных транзиентов.

Для этого предлагается проект совместных наблюдений потоков энергичных састиц и высотных электромагнитных разрядов, в том числе в арктическом регионе, в ходе наземных и космических экспериментов. В рамках этого подхода предполагается разработка однотипного оборудования, которое должно размещаться на космических аппаратах, выводимых на полярные орбиты, а также на сети наземных станций, расположенных вдоль магнитного меридиана. Предполагается, что на наземных станциях и космических аппаратах должны быть установлены детекторы для регистрации ультрафиолетового и инфракрасного излучения транзиентных оптических явлений, детекторы рентненовского, гамма-излучеия и электронов, датчики радиоизлучения, электричсекого и магнитного полей. С помощью указаных приборов должны быть обеспечены одновременных наблюдений наземными средствами, на спутниках и метеорологических зондах. В качестве космического сегмента данного проекта может использоваться разработанное в НИИЯФ МГУ оборудование для радиационного мониторинга, которое предполагается разместить на планируемых к запуску космических аппаратах «Арктика» и «Ионосфера».

Концепция космической системы на основе группировки малых спутников для мониторинга космических угроз

Для реализации проекта «Универсат-СОКРАТ»предполагается в минимальном варианте использовать группировку из трех космических аппаратов [1]. Взаимное расположение орбит представлено на рис. 1.

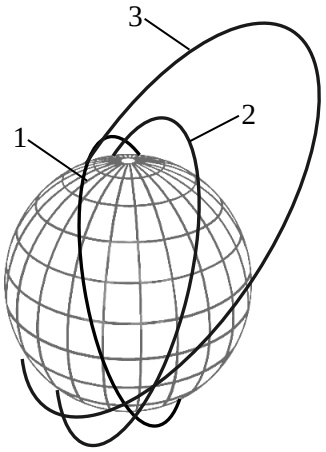


Рис. 1. Взаимное расположение орбит группировки малых КА.

Основные задачи КА №1 это мониторинг опасных объектов и явлений, изучения электромагнитных транзиентных явлений, также на этом аппарате должны осуществляться измерения потоков космической радиации (электронов и протонов) в рамках системы радиационного мониторинга [2].

Параметры орбиты КА № 1 определяются поставленными выше задачами, поэтому он должен размещаться на низкой солнечно-синхронной орбите высотой 500–650 км. Такая орбита обеспечивает наблюдение разных областей верхней атмосферы и околоземного пространства – от экваториальных до полярных, а также создает благоприятные фоновые условий для измерений всплесковых явлений в гамма-диапазоне. Кроме того, на этом спутнике должны размещаться наиболее массивные приборы целевой аппаратуры, поэтому необходимая масса полезной нагрузки КА №1 не менее 130 кг, что также обуславливает требование низкой круговой орбиты. На КА №1 должны быть установлены следующие приборы: комплекс приборов для оптического мониторинга опасных объектов, комплекс научной аппаратуры для изучения тразиентных атмосферных явлений (ТАЯ) в оптическом диапазоне, комплекс научной аппаратуры для мониторинга в гамма-диапазоне, аппаратура для мониторинга космической радиации, а также блок сбора информации (БСИ). По основным задачам и составу целевой аппаратуры КА №2 и №3 идентичны. Основной задачей этих аппаратов является обеспечение радиационного мониторинга с целью построения 3-мерной картины текущего распределения потоков протонов и электронов в значительной области радиационных поясов Земли. Для построения текущей 3-мерной картины потоков нами выбран подход, предусматривающий охват большого диапазона L-оболочек (от $L = 1.2$ до $\approx 5 \div 7$), и для каждой из них – измерения всенаправленных потоков частиц в разных точках L-оболочки на разных высотах, а затем расчёт высотного хода потоков для всей L-оболочки путём интерполяции и экстраполяции данных измерений с использованием известных теоретических и эмпирических закономерностей.

При этом выбор орбиты должен учитывать характерную форму высотного хода потоков частиц радиационных поясов.

В качестве орбиты КА для радиационного мониторинга выбрана эллиптическая орбита с высотами перигея и апогея ≈600 и 8000 км, наклонением 63.4° и начальным аргументом перигея ≈310° (орбита «3» на рис. 1). Орбита пересекает характерные области высотного хода потоков. При этом на каждом витке КА несколько раз пересечёт каждую *L*-оболочку на разных высотах.

Как следствие, для $L = 1.2$ высот ≤8000 км текущий высотный ход потоков может строиться путём интерполяции измерений. Для высот >8000 км будет осуществляться экстраполяция высотного хода — это возможно сделать, поскольку, как видно из правого графика рис. 3, потоки в этой области меняются слабо, по простому степенному закону.

Рассматривается также вариант, при котором один из КА №2 или №3 вместо эллиптической орбиты будет выведен на круговую орбиту высотой ≈1500 км, либо эллиптическую орбиту высотой 800–2000 км и наклонением ≈80° (орбита «2» на рис. 2). Для такой орбиты существует больше возможностей попутного запуска.

На каждом из КА №2 и КА №3 должна быть установлена аппаратура для мониторинга космической радиации и блок электроники, осуществляющий связь с бортовыми системами спутника, На КА №2 и КА №3 также могут решаться вспомогательные задачи по оптическим наблюдениям и регистрации электромагнитных транзиентов. Поэтому на них также может быть установлен компактный гамма-спектрометр, оптическая камера широкого поля зрения, детектор УФ-излучения (ДУФ). Оптические камеры на КА №2 и КА №3 предназначены для мониторинга ближнего и дальнего (до нескольких миллионов километров) пространства с целью поиска неотождествленных объектов искусственного и естественного происхождения.

Аппаратура для мониторинга космической радиации должна включать спектрометр протонов в диапазоне энергий от 2 до >160 МэВ и электронов в диапазоне энергий 0.15–10 МэВ (СПЭ). Его основным элементом является сборка типа «телескоп», включающая несколько полупроводниковых детекторов различной толщины и сцинтилляционный детектор, расположенные соосно один под другим. Для измерения питч-углового распределения потоков и всенаправленных потоков частиц будет использоваться несколько телескопов с разной пространственной ориентацией. В составе аппаратуры также должен использоваться 3-компонентный магнитометр.

Комплекс приборов для оптического мониторинга опасных объектов должен состоять из двух широкопольных оптических камер (мини-телескопов) и сканирующего телескопа с диаметром входного окна 120 - 250 мм и рабочим полем зрения до 100 квадратных градусов. Камеры широкого поля зрения успешно прошли летно-конструкторские испытания в составе спутника «Ломоносов» [3]. Параметры широкопольных камер: поле зрения ~20×40°, ПЗС матрица 24×36 мм на 12 мегапикселей. Данные с каждой камеры анализируются процессором, осуществляющим как подробную запись видеоряда (до 5 кадров в секунду) по триггеру от гамма-детектора (гамма-всплески), так и выборку видеофрагментов, относящихся к космическим аппаратам, космическому мусору, астероидам и другим объектам.

Группировка КА «Универсат-СОКРАТ» должна осуществлять мониторинг в режиме, близком к реальному времени. Для передачи алертов в случае регистрации гамма-всплеска или потенциально опасного объекта предполагается задействовать дополнительную систему связи (прорабатываются варианты использования как спутниковых систем связи, так и развертывание системы наземного оперативного приёма информации). Оперативная передача информации о регистрируемых гамма всплесков в мировую сеть координат гамма всплесков GammaCoordinateNetwork (GCN) через модем системы «Globalstar» была успешно отработана на спутнике «Ломоносов».

Комплекс научной аппаратуры для изучения ТАЯ в УФ и оптическом диапазонах должен включать пространственно-чувствительный спектрометр – малый линзовый телескоп (МЛТ) с высоким временным разрешением для измерения спектра оптического излучения ТАЯ и молний и детектор УФ и ИК излучения ДУФИК – аналог детекторов на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов» (для сравнения данных нового КЭ с данными предыдущих), дополненный каналами измерений в дальнем УФ-диапазоне.Измерение спектра необходимо для определения типа и высоты генерации ТАЯ, а также выделения молниевых разрядов по характерной линии 777 нм и по отсутствию сигнала в области линии поглощения кислорода – 762 нм). Оси приборов МЛТ и ДУФИК должны быть ориентированы в надир с углами незатенения ±90° относительно визирных осей детекторов. Прибор МЛТ должен состоять из линзового широкопольного объектива и позиционно-чувствительного детектора в виде мульти-анодного ФЭУ, а также набора фотоумножителей для измерения длинных временных рядов сигналов ТАЯ с чувствительностью ~50 фот/см^{2}мкс и временным разрешением 1 мкс. В конструкции прибора предусмотрено до 16 спектральных каналов.

Прибор ДУФИК должен состоять из трех фотоумножителей, входные окна которых закрыты светофильтрами, обеспечивающими работу в разных спектральных диапазонах – инфракрасном (600–800 нм), ближнем УФ (240–400 нм), солнечно-слепом (100–300 нм). Кроме того, в его состав должен входить оптический детектор на основе микроканальной пластины (МКП), обеспечивающий регистрацию излучения в диапазоне от дальнего УФ до мягкого рентгеновского.

Комплекс научной аппаратуры для мониторинга в гамма-диапазоне должен включать три широконаправленных сцинтилляционных детектора гамма-излучения типа БДРГ [4] для контроля верхней

атмосферы и обзора неба в диапазоне 10–3000 кэВ и трековый гамма-спектрометр высокого разрешения и чувствительности. Детекторный узел каждого блока БДРГ выполнен в виде сборки тонкого (0.3.см) сцинтиллятора NaI(Tl) и сцинтиллятора CsI(Tl) большей толщины (1.7 см) цилиндрической формы. Оба сцинтилляционных кристалла имеют одинаковый диаметр 13см и просматриваются одним фотоумножителем – так называемый «фосвич». Оси трех гамма детекторов типа БДРГ должны быть перпендикулярны друг другу и направлены вдоль взаимно перпендикулярных ребер куба, образуя собственную Декартову систему координат. При этом главная диагональ куба должны быть ориентирована в надир.

Трековый гамма-спектрометр высокого разрешения и чувствительности представляет собой комбинацию позиционно-чувствительного детектора (ПЧД) с кодирующей маской. В состав прибора также входит годоскопический узел на основе сцинтилляционных волокон. Ось прибора должна быть направлена вдоль оси «надир-зенит», при этом со стороны кодирующей маски прибор должен быть ориентирован в зенит, а со стороны годоскопического узла – в надир. Эффективная площадь гамма-спектрометра ~250 см^2, диапазон энергий 50 - 5000 кэВ (в режиме кодирования 50-1000 кэВ), угловое разрешение ~2°, поле зрения полного кодирования ±25° градусов. Гамма-телескоп дает возможность проводить проверку появления точечного источника и, таким образом, отделять гамма-всплески различной природы от высыпаний частиц. Аппаратура также включает блок анализа данных, содержащий узлы цифровой электроники, позволяющие вести запись показаний с высоким временным разрешением (до 10 мкс), проводить оперативный анализ изображений с телескопа с кодирующей маской, а также вырабатывать триггер гамма-всплеска. Трековый гамма-спектрометр также может использоваться для идентификации делящихся материалов на борту космических аппаратов и контроля «радиоактивного мусора».

Заключение

Несмотря на разнообразность поставленных перед проектом «Универсат-СОКРАТ» целей по мониторингу потенциально опасных объектов в космосе, их объединение в рамках единой космической системы представляется экономически выгодным по сравнению с проектами, направленными на реализацию мониторинга только одного из опасных космических факторов. Действительно, в данном проекте основная доля массы полезной нагрузки, информационного потока и финансовых затрат приходится на оптические роботизированные системы наблюдений. Остальные предлагаемые приборы мониторинга составляют меньшую долю от общей массы полезной нагрузки, информационного потока и финансовых затрат. Кроме того, следует принять во внимание, что бортовой вычислительный комплекс, предназначенный для бортовой обработки информации, технически и экономически оптимально создавать для комплекса приборов на одной платформе КА, чем на разных КА для выбранных «однонаправленных» целевых приборов. Именно поэтому представляется целесообразным объединение отдельных экспериментов в единую систему с целью реализации бюджетного проекта, реализуемого на базе малых КА с общей массой не превышающей 150 кг. Помимо этого, реализация такой схемы проекта позволяет снизить затраты на наземный сегмент управления и приема информации по сравнению с «распределенными» проектами, выполняющими задачи мониторинга только одного из опасных космических факторов.

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор №RFMEFI60717X0175).

Литература

1. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др. Оперативный радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве на базе многоярусной группировки малых космических аппаратов. Космические исследования, 2015, т. 53, № 6, сс. 461–468 (CosmicResearch, pp. 423–429).
2. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др. Оптимизация измерений потоков частиц радиационных поясов Земли. Космические исследования, 2017, т. 55, № 2, сс. 85–93 (CosmicResearch, pp. 79–87).
3. Lipunov V.M.,·Gorbovskoy E.S.,·Kornilov V.G. SHOK – The first Russian wide-field optical camera in space. Space Science Reviews. 2018, 214, 6.
4. Амелюшкин А.М., Галкин В.И., Гончаров Б.В. и др. Приборы БДРГ И ШОК для исследования собственного излучения гамма-всплесков на борту космического аппарата «Ломоносов»». Космические исследования, 2013. Т.51, №6, сс. 478–483 (CosmicResearch, pp. 434–438)

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 85-87
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.85-87

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АВТОНОМНОЙ УДАЛЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ СБОРА КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА СТАНЦИИ ВОСТОК В АНТАРКТИДЕ

В.А. Соловей, А.А. Захаров, Д.С. Карлов, С.А. Булат, В. И. Семенихин

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина (*e-mail: solovei_va@pnpi.nrcki.ru)*

Аннотация. На антарктической станции Восток испытана система обеспечения электропитания с использованием четырех солнечных панелей. Система обеспечивает круглосуточную мощность 350 Вт для работы автономной удаленной автоматической станции для сбора космической пыли. Система продемонстрировала работоспособность в летний период при температуре -45°С и сохранность солнечных панелей после трех зимовок при температурах ниже -80°С.

Abstract. The power supply system with four solar panels was tested at the Antarctic station Vostok. The system provides around the clock power of 350 W for operation of a remote automatic station for collecting space dust. The system has demonstrated its performance in summer time at -45°C and the reliability of solar panels after three wintering at temperatures below -80°C.

С целью выполнения работы по сбору космической пыли и микрометеоритов путем фильтрации воздуха через съемный стерильный фильтр с использованием вентилятора, необходимо обеспечить электропитание вентилятора в автономных условиях на удалении от станции Восток. В летний сезонный период, когда проводятся научные работы, солнце круглосуточно находится над линией горизонта и температура окружающего воздуха поднимается до значений -45°С ÷ -30°С.

При построении системы автономного электропитания с использованием солнечных панелей возникает вопрос о надежности и рабочих характеристиках панелей и аккумулятора в условиях низких температур и вопрос о необходимости демонтажа солнечных панелей на зимний период, когда температуры опускаются ниже -80°С.

На станции Восток была создана и испытана система обеспечения электропитания автономной удаленной автоматической станции для сбора космической пыли в состав которой входит следующее оборудование:

- солнечная панель HH-MONO230W в количестве 4-х штук;
- контроллер солнечной батареи и заряда аккумулятора eTracer ET-6415N;
- DC/AC инвертор (преобразователь напряжения) ИС-12-3000;
- гелевый аккумулятор DeltaGX 12-200.

Для снижения воздействий низких температур контроллер солнечной панели и заряда аккумулятора eTracer ET-6415N, DC/AC инвертор ИС-12-3000 и гелевый аккумулятор DeltaGX 12-200 помещались в пенопластовый ящик с толщиной стенки 5 см для использования эффекта самоподогрева работающего оборудования. При падении внешней температуры до -45^{O}С температура внутри пенопластового ящика была на 10^{O}С выше. Сбои в работе оборудования не наблюдались. Контроль функционирования системы осуществлялся с помощью доступа через Ethrenet к серверу eTracer Monitor, встроенному в eTracer ET-6415N. Сервер предоставлял доступ к следующей информации: данные в реальном времени, контрольные параметры, сетевые установки, архив данных, пароли, справка. Работа eTracer ET-6415N контролировалась как через LAN так и удаленным образом через беспроводной Ethernet с помощью изделий RoscetM5 и airMax антенн.

В процессе тестирования солнечной панели был построен график выработки электричества при ориентации панели на север в зависимости от времени суток (см. рисунок 1). Солнечная панель при ориентации на север вырабатывала в среднем 150 Вт/час, обеспечивая энергию в течение 8 часов (120 градусов по горизонту). При ориентации солнечной панели на юг, она в течение 8 часов вырабатывала порядка 130 Вт/час. Существенного изменения в выработке электричества при параллельном или последовательном включении солнечных панелей обнаружено не было.

Система испытывалась при больших кратковременных нагрузках в цепи ~220 В на выходе DC/AC инвертора ИС-12-3000. В качестве нагрузки использовался электрочайник мощностью 2 кВт. Замечаний к работе системы не возникло.

Коэффициент полезного действия AC/DC преобразователя ИС-12-3000 равен примерно 90%, значит потребляемая мощность от аккумуляторной батареи 350/0,9 = 390 Вт. Такую нагрузку обеспечат три солнечные батареи HH-MONO230W при ориентации на 115 и 255 градусов без разряда буферного аккумулятора модели GX 12-200.

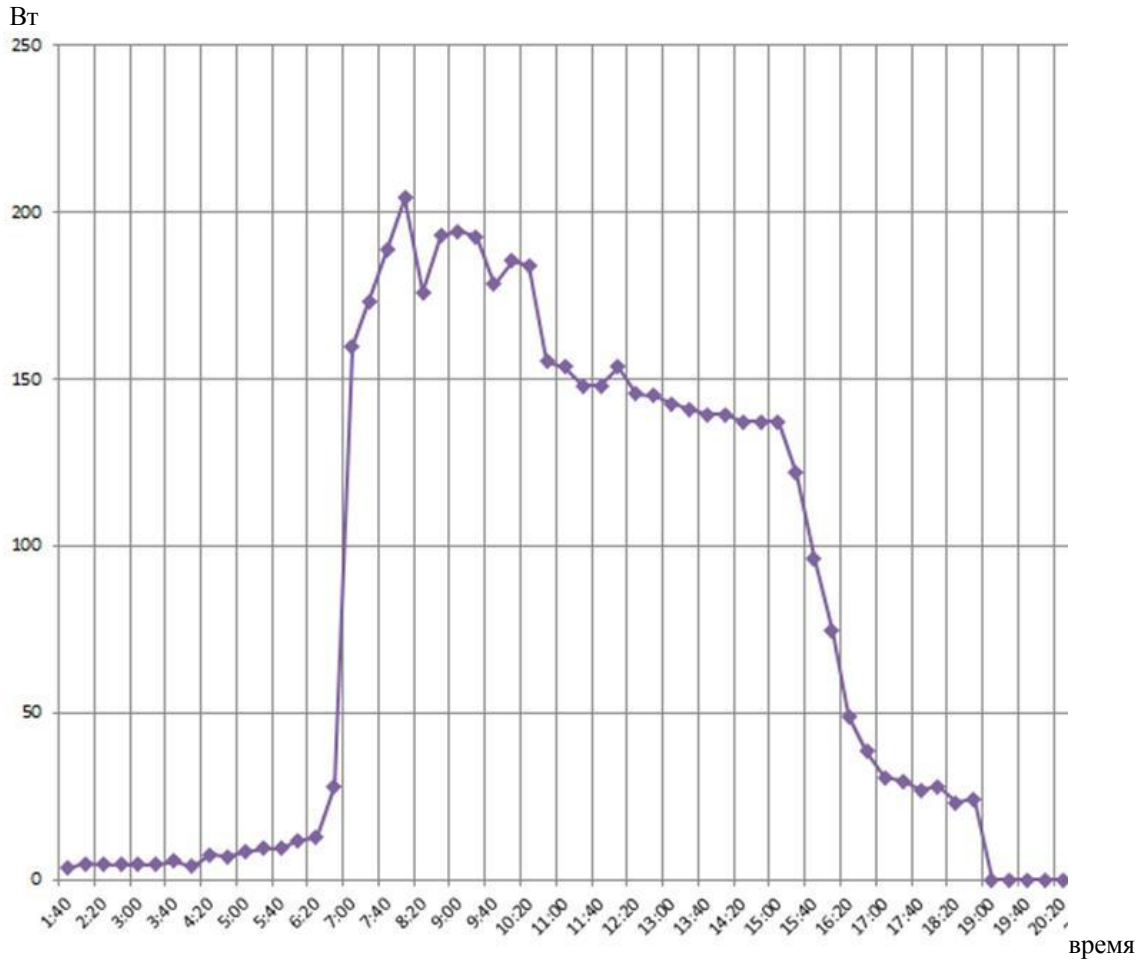


Рисунок 1. График выработки электричества солнечной батареей при ориентации на север

Ток снимаемой с аккумуляторной батареи GX 12-200 при её номинальном напряжении 12,6 В равен 390/12,6=31А, ток разряда составляет порядка 0,15С. Согласно графику приведенному на рисунке 2, при таком токе разряда и температуре аккумулятора -20°С, номинальная емкость аккумулятора составляет 50% или 100 Ач.
Для нагрузки в 350 Вт на выходе AC/DC преобразователя в течении 1-го часа требуется снять с аккумулятора 31 Ач, что составляет порядка 30% его емкости. Запаса емкости аккумулятора хватает на 3 часа работы.

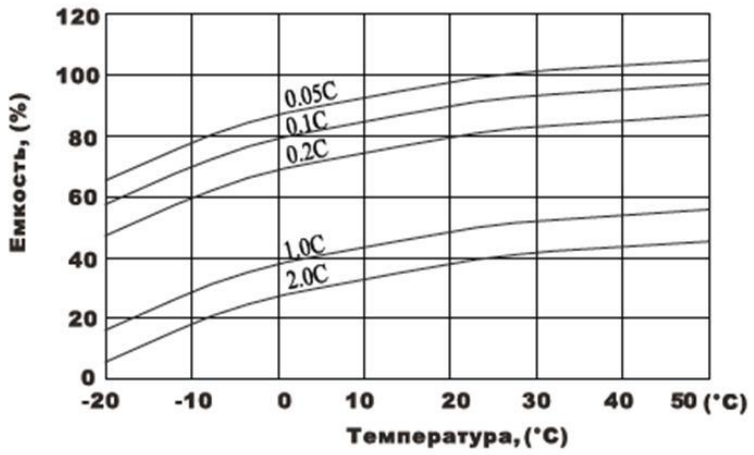


Рисунок 2. Влияние температуры на емкость аккумулятора Delta GX 12-200

Для электроснабжения научного оборудования в удалении от станции Восток в сезон 59 РАЭ были установлены 4 панели солнечных батарей. В сезон 63 РАЭ произведена проверка состояния солнечных батарей. За прошедшие с момента установки солнечных батарей три зимовки они сохранили свои рабочие характеристики, однако были частично занесены снегом. Каждая панель в солнечный день обеспечила напряжение 35 В и мощность 200 Вт.

Для обеспечения бесперебойного питания автономной удаленной автоматической станции с нагрузкой 350Вт при напряжении 220В 50Гц в течении 3-х летних месяцев предлагается в будущем использовать 6 солнечных панелей. Панели следует расположить треугольником на металлическом каркасе из труб и поднять на 0,5 м над поверхностью снега для предотвращения заметания. Панели, направленные на север, следует расположить под углом 60˚ к горизонту, другие панели расположить под углом 70˚ к горизонту.



Рисунок 3. Солнечные панели около станции Восток (78°28'2" S 106°49'1" E)

Заключение

Система обеспечения электропитания с использованием солнечных панелей, продемонстрировала свою работоспособность в антарктических условиях при температурах -45°С в летний сезон и сохранила рабочие характеристики после трех зимовок при температурах ниже -80°С. Система в составе четырех панелей HH-MONO230W, гелевого аккумулятора DeltaGX 12-200, контроллера eTracer ET-6415N и DC/AC инвертора ИС-12-3000, помещенных в теплоизоляционный бокс, обеспечила круглосуточное бесперебойное питание автоматической станции для сбора космической пыли с нагрузкой 350 Вт.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 88-89
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.88-89

ВАРИАНТ СХЕМЫ ЗОНДИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ МАЛОГО КА И ТЕХНОЛОГИИ МОРСКОГО БУЯ

А.В. Тертышников

Институт прикладной геофизики, Москва, Россия.

Предлагается схема зондирования состояния полярной магнитосферы на основе малого КА и по схеме радиопросвечивания ионосферы на нескольких частотах, в том числе «снизу – вверх» сигналами радиомаркера у поверхности океана (льда) или в атмосфере, с борта судна, и приемником сигналов с антенной на космических аппаратах.

Обширные пространства над акваториями морей и океанов, над Арктической зоной характеризуются крайне редкими островными или прибрежными пунктами зондирования состояния полярной магнитосферы. Полярная магнитосфера над океанами остается слабоизученной [1]. Для мониторинга полярной магнитосферы, в том числе над океанами, обычно используются спутниковые технологии зондирования, в том числе ионосферы, и модели [2]. Но полученные на их основе результаты не соответствуют рекомендациям Всемирной метеорологической организации к мониторингу ионосферы и состояния полярной магнитосферы.
Для зондирования состояния полярной магнитосферы предлагается использовать малые КА с детекторами низкоэнергичных электронов для диагностики характеристик аврорального овала и схема радиопросвечивания ионосферы «снизу – вверх» с автономным радиомаркером – источником просвечивающих ионосферу радиосигналов у поверхности Земли или в атмосфере и приемником сигналов с антенной на космических аппаратах (рис. 1).

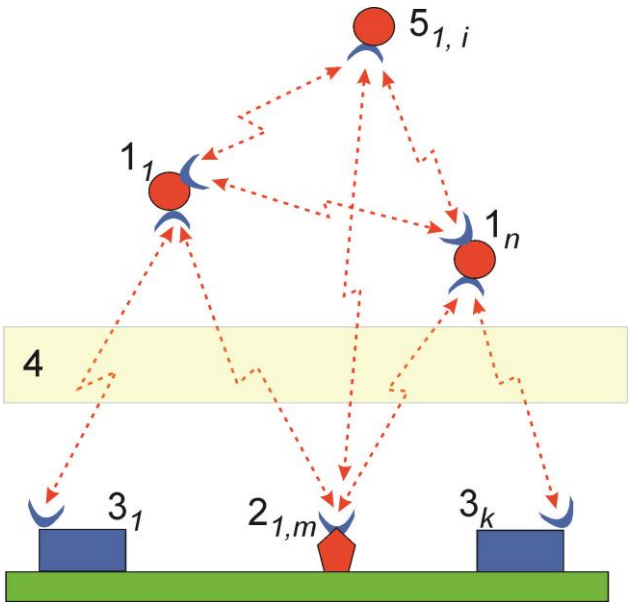


Рис. 1. Предлагаемая схема зондирования: 1 – КА с приемниками, 2 – радиомаркеры, 3 – пункты приема и обработки информации, 4 – ионосфера, 5 –КА ГНСС и геостационары.

Радиомаркер на базе морского буя должен быть оснащен блоком питания и антенной, хронизатором, что в целом на порядки дешевле используемых в прототипе профессиональных геодезических приемников. Это позволяет использовать радиомаркеры в качестве расходных инструментов, что особенно актуально для обширных территорий океанов и морей, труднодоступных территорий Арктики. Корпус радиомаркера должен обеспечивать сохранность блока энергопитания, приемовычислителей и антенн от воздействий природной среды.

Приемные устройства на КА, принимающие через антенные устройства сигналы подионосферных радиомаркеров, формируют поток информации в бортовых приемо-вычислителях КА с последующей ретрансляцией полученных результатов через бортовые системы связи, хранения и передачи данных в пункты приема обработки и хранения информации или через систему подвижной спутниковой связи.

Полученная информация легко интегрируется в существующую систему мониторинга полярной магнитосферы и ионосферы. А в случае использования автономных радиомаркеров позволяет расширить территорию зондирования над океанами и труднодоступными районами Земли.

Цена предлагаемого серийного автономного радиомаркера для зондирования состояния полярной магнитосферы составляет на 2 порядка меньше стоимости наземной станции ионосферного зондирования. По сравнению с объемом обычной телеграммы ГНСС, экономия в объеме передаваемой и обрабатываемой информации в предлагаемой схеме может достичь двух порядков, что важно, так как абонентское обслуживание системой подвижной спутниковой связью не дешево.

Литература

1. Тертышников А.В. Способ определения положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Решение РОСПАТЕНТа от 19.07.2016 г. о выдаче патента на изобретение по заявке № 2015126532/28(041268) от 02.07.2015 г. .

2. Тертышников А.В., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации/ Патент, заявка № 2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013 № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 90-93
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.90-93

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА ПО ЗОНДИРОВАНИЮ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО СИГНАЛАМ ГЛОНАСС С БАРЕНЦБУРГА

А.В. Тертышников[1], В.В. Удриш[2], И.И. Иванов[3], Я.В. Глухов[1], Д.С. Ковалев[4], В.М. Смирнов[5]

[1] *ФГБУ «ИПГ» им Е. К. Федорова, Москва(e-mail: atert@mail.ru)*
[2] *Гидрометеорологическая Служба ВС РФ, Москва*
[3] *НИИФ ЮФУ, Ростов-на-Дону,*
[4] *САФУ, Архангельск*
[5] *ФГБУН ФИРЭ, Фрязино*

Аннотация. Представлены результаты зондирования следов аврорального овала с помощью приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с Баренцбурга на Шпицбергене

Abstract. The paper presents the results of sensing the traces of the auroral oval using the global navigation satellite systems (GNSS) signal receiver from the Barents region on Svalbard

Введение

В 2016 г. для ФГБУН ПГИ был предложен инициативный проект по зондированию аврорального овала по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В проекте предполагалось использование уникального расположения навигационного приемника ФГБУН ПГИ в Баренцбурге для радиопросвечивания аврорального овала для проверки патента [1].

Схема зондирования и ее проверка

Предложенная схема зондирования овала примитивна: с установленного на станции приемника сигналов ГНСС отслеживается прохождение отдельных навигационных космических аппаратов (КА) ГНСС, по траектории которых анализируется изменение ионосферной задержки принимаемых сигналов, проходящих зону овала [1-3]. Проверка этой схемы проводилась в морских экспериментах по зондированию северной полярной шапки в навигацию 2011-2015 г.г. в Российском секторе Арктики [3]. Особенностью технологии является подвижный пункт зондирования ионосферы [3, 4]. Исследовалась также морфология ионосферы над магнитным полюсом Земли [2].

В результате обработки данных наблюдений ионосферных задержек сигналов ГНСС было выявлено проявление следов аврорального овала при нахождении экспедиционного судна с навигационным приемником внутри овала вблизи кромки сплошных льдов [1, 2].

Разработанная технология зондирования аврорального овала по сигналам ГНСС после валидации по данным модели IRI-2011 и по данным с наземных ионозондов была апробирована также в ходе 60-й Российской антарктической экспедиции (2014-2015 г.г.) при движении санно-гусеничного поезда по льду Антарктиды к станции «Восток» [5]. Измерения проводились с навигационного приемника («JAVAD»), который был доставлен научно-экспедиционным судном «Академик Федоров» к Российской антарктической станции «Прогресс» и вошел в состав научного оборудования санно-гусеничного поезда.

При зондировании полярной ионосферы рассчитывалось ПЭС в подионосферных точках видимых КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Данные зондирования ионосферных задержек сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS обрабатывались авторским дифференциальным методом зондирования ионосферы и геодвижений [4]. Его валидация ранее проводилась в экспериментах на нагревном стенде "Сура", на Байконуре, в Приэльбрусье, в сейсмоактивных регионах [6], при определении эпицентра взрыва Чебаркульского метеороида [7]. Для технологии подвижного зондирования ионосферы был разработан программно-аппаратный комплекс [8] обработки полученных с навигационного приемника RINEX-файлов. Его настройка проводилась в течение нескольких месяцев при сравнении с данными модели ионосферы IRI-2011 в ФГБУ ИПГ (Москва). Этот прием калибровки позволил получить оценки аппаратных и инструментальных ошибок по каждому космическому аппарату ГНСС.

Предварительные оценки положения аврорального овала позволяют получить его климатические модели [9, 10], в соответствии с которыми овал должен проявляться в относительном ПЭС в узком диапазоне широт. Для оперативной оценки положения аврорального овала над Антарктидой имеется ресурс модели SIMP2 [10], в которой для расчета медианы критической частоты Е-слоя авроральной области использована эмпирическая модель, косвенно учтены авроральный источник ионизации атмосферы и солнечный источник

ионизации атмосферы, то есть корректируется смещение рассчитанной зоны повышенной концентрации E-слоя в течение суток в зависимости от положения Солнца. Результаты моделирования медианы критической частоты E-слоя авроральной области по модели SIMP2 могут использоваться в качестве основных прогнозных ориентиров в экспериментах по радиопросвечиванию зоны аврорального овала сигналами ГНСС.

В рассчитанных по модели SIMP2 полях ПЭС почти не видно аврорального овала! Это физически объяснимо особенностями вертикального распределения электронной концентрации выше E-слоя высокоширотной ионосферы. Однако, как показали морские эксперименты в Арктике в 2011-2015 г.г., следы аврорального овала диагностировались в полном электронном содержании ионосферы (ПЭС в вертикальном столбе) по характеристикам сигналов отдельных КА ГНСС и в восстановленном поле ПЭС.

Результаты зондирования овала с Баренцбурга

По предоставленному руководством ФГБУН ПГИ трехчасовому (12-00 до 15-00 28.10.2015 г.) отрезку сырых наблюдений характеристик сигналов ГНСС с навигационного приемника в Баренцбурге были рассчитаны траектории видимых КА ГНСС (рис. 1).

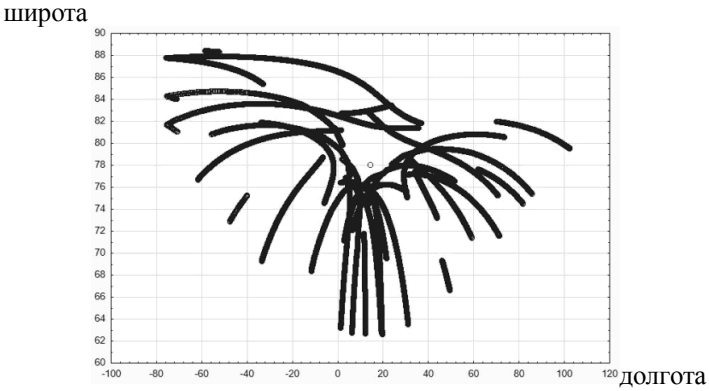


Рис. 1 – Подионосферные проекции траекторий видимых КА ГНСС для приемника в Баренцбурге с 12-00 до 15-00 UTC 28.10.2015 г..

Результаты моделирования E-слоя ионосферы по модели SIMP2 [10] представлены на рис. 2. Состояние магнитного поля 28.10.2015 г. было спокойное [11, 12].

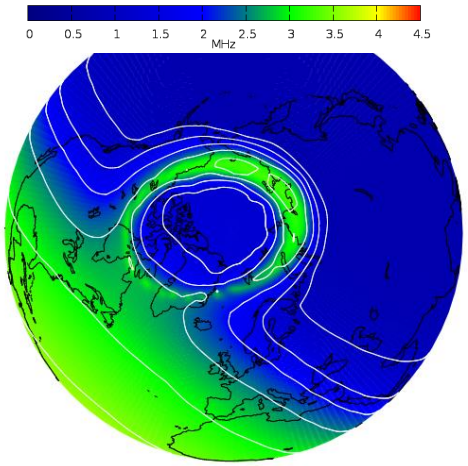


Рис. 2 – Результаты моделирования E-слоя ионосферы по модели SIMP2 на момент 14-35 UTC 28.10.2015 г.

В наблюдениях сигналов КА ГНСС в направлении на Солнце увеличивается повторяемость сбоев и шумов. Это известная особенность в функционировании ГНСС, особенно для GPS. В исследованиях основное внимание уделялось отечественной системе ГЛОНАСС.

Положение аврорального овала начинает хорошо просматриваться к вечеру перед формированием среднеширотного ионосферного провала и ночью – рис. 3.

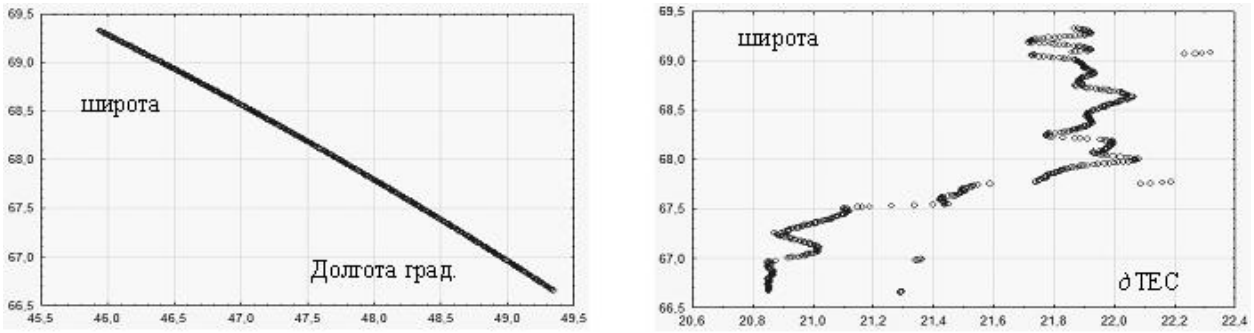


Рис. 3 – Результаты радиопросвечивания ионосферы с Баренцбурга.
Правый фрагмент – распределение относительного содержания электронов в ионосфере вдоль нисходящей траектории КА R14 с 14-51 до 15-00 UTC 28.10.2015 г., левый фрагмент – проекция подионосферных точек нисходящей траектории КА R14 с 14-51 до 15-00 UTC 28.10.2015 г.

КА R14 (R – принадлежность к ГЛОНАСС) на рис. 3 уходил из зоны аврорального овала на юго-восток. Относительно Баренцбурга он находился в восточном секторе. Там ионосфера была вечерняя. Резкое уменьшение ионосферной задержки принятых сигналов ГНСС ниже 68 градусов с.ш. является стенкой аврорального овала. По данным о потоках низкоэнергичных электронов на указанных долготах в 17-00 UTC наблюдалось повышенная интенсивность на широте 67 градусов.
Изменение оценок полного электронного содержания над Баренцбургом в течение анализируемого отрезка времени по всем видимым КА ГНСС представлено на рис. 4.

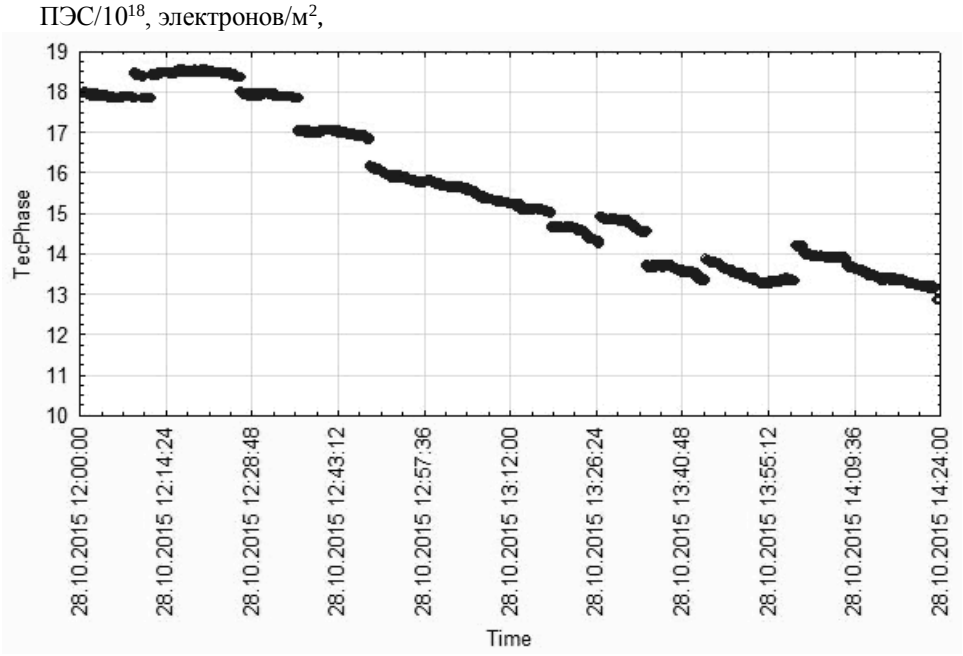


Рис. 4 – Изменение полного содержания электронов в ионосфере над Баренцбургом с 12-00 до 14-24 UTC 28.10.2015 г.

Разрывы кривой обусловлены использованием всех видимых КА ГНСС, количество которых менялось, и влиянием аврорального овала. Отмечена также низкая плотность ионосферы над магнитным и географическим полюсом, то есть внутри полярной шапки.
На этом эксперимент был прекращен, так как поставленная цель была достигнута – получены положительные результаты экспериментальной проверки патента [1].

Заключение

В ходе эксперимента по приему сигналов ГНСС со станции Баренцбург проведено радиопросвечивание аврорального овала.
Для оценивания полученных результатов зондирования аврорального овала использованы результаты

расчета положения Е-слоя ионосферы по модели SIMP-2 и модели Г.В. Старкова.
Полученное соответствие выявленных признаков наличия овала и результатов моделирования признано удовлетворительным.
Определены перспективы дальнейших исследований.

Благодарности

Авторы благодарят заведующего лабораторией ФГБУН ПГИ Р. Ю. Юрика и заместителя директора ПГИ В. Ф. Григорьева за предоставленный трехчасовой файл данных сырых наблюдений с навигационного приемника в Баренцбурге, а также К. Г. Цыбулю (ЦПГ) за консультации по работе с моделью SIMP2.

Литература

1. Тертышников А.В. Способ определения положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Решение РОСПАТЕНТа от 19.07.2016 г. о выдаче патента на изобретение по заявке № 2015126532/28(041268) от 02.07.2015 г.
2. Тертышников А.В., Чукин В.В., Глухов Я.В., Ковалев Д.С. Эксперименты по исследованию ионосферы с Арктического плавучего университета // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 41. С.156-164.
3. Тертышников А.В. Технология зондирования положения ионосферного овала и морфологии высокоширотной ионосферы по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. // Гелиогеофизические исследования, 2015 (http//vestnik.geospace.ru/index.php?id=304);
4. Тертышников А.В., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации/ Патент, заявка № 2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013, № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013.
5. 60-я Российская антарктическая экспедиция 2014-2015 гг. / https://www.glonass-iac.ru/aboutIAC/the_south_sea_route_in_2014_real_time.php.
6. Тертышников А.В. Вариации характеристик псевдопозиционирования навигационных приемников вблизи слабого землетрясения в Туапсе 8.09.2010 г.//Физика Земли, 2017. № 1. С. 1-6.
7. Тертышников А.В. и др. Способ определения положения эпицентральной зоны источника и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений. Патент на изобретение № 2560525. ФИПС, Рег. № 2014125712/07(041820) от 25.06.2014б. Срок действия до 25.06.2034 г.
8. Глухов Я.В. Программа расчета относительных значений полного электронного содержания по характеристикам ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo. – Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619293, ФИПС, 01.10.2013.
9. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения//Геомагнетизм и аэрономия, 1994, т. 34, № 3. С. 80-86.
10. http://space-weather.ru/index.php?page=raschet-sostoyaniya-ionosfery-po-modeli-simp.
11. Тертышников А.В. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений // Гелиогеофизические исследования, 2014, Вып. 5 (http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666).
12. http://www.celestrak.com/SpaceData/.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 94-97
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.94-97

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.Г. Тлатов[1,2], А.В. Тертышников[3]

[1]*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск (e-mail: tlatov@mail.ru)*
[2]*КалмГУ, Элиста*
[3]*ФГБУ «ИПГ» им Е. К. Федорова, Москва(e-mail: atert@mail.ru)*

Аннотация. Обсуждаются перспективы создания системы прогноза параметров космической погоды (КП), на основе наземных национальных средств наблюдений солнечной активности. Космическая погода - это общий термин, используемый для описания ряда обусловленных Солнцем процессов, способных оказать негативное влияние на популяции и технологические системы. Район высоких широт (включая Арктику) является наиболее уязвимым к проявлениям КП. Рассмотрены возможности наблюдательного комплекса Кисловодской Горной астрономической станции ГАО РАН, а также комплекс математических моделей для прогнозирования параметров солнечного ветра и геомагнитных возмущений.

Abstract. The prospects for creating a system for predicting the parameters of space weather (SW), based on national ground-based means of observing solar activity, are considered. Space weather is a general term used to describe a series of processes that can have a negative impact on living organisms and technological systems located on Earth, in near and far space, the source of which is the Sun. The area of high latitudes (including the Arctic) is the most vulnerable to SW manifestations.

Введение

Космическая погода (КП) обусловлена солнечной активностью (СА). Из солнечной короны непрерывно истекает корпускулярный поток в виде солнечного ветра (СВ). Солнце является источником излучения в рентгеновском, ультрафиолетовом и радиодиапазонах. Оценка этих потоков, а также их интенсивности необходима для прогноза КП [1]. В высоких широтах проявления КП особенно яркие.

Информация о солнечной активности необходима для мониторинга гелиогеофизических условий в Арктике. При этом требуются длительные однородные ряды наблюдений (архивы), технологии обработки и анализа большого объема данных, модели распространения солнечного ветра и корональных выбросов массы (КВМ) через межпланетную среду, технологии гелиогеофизического обеспечения, коммуникации, средства наблюдения солнечной активности. Данные наблюдений используются для:

- диагностики: 1) солнечных вспышек, 2) корональных выбросов массы, 3) состояния гелиосферы;
- прогнозирования воздействия солнечной активности на магнитосферу, ионосферу и верхнюю атмосферу;
- получения длительных однородных рядов наблюдений различных проявлений солнечной активности («космический климат»).

В данной работе рассмотрены возможности создания службы КП (СКП) на основе наземных средств наблюдения за солнечной активностью.

Схема системы прогноза КП

Можно выделить три основные составляющие прогноза КП. Во-первых, это определение параметров СВ, когда на Солнце нет возмущений вспышечного характера, приводящих к КВМ в межпланетную среду, так называемый спокойный солнечный ветер. Второй составляющей является оценка квазипостоянных потоков УФ и рентгеновского излучения, а также их оценка во время солнечных вспышках. Третьей задачей является регистрация эруптивных процессов и оценка геоэффективности КВМ.

Практическая реализация прогноза КП, осуществленная в ряде западных стран, основана комплексных наблюдениях Солнца, в том числе и наземными обсерваториями, например, для наблюдений магнитного поля, и регистрации вспышек и КВМ орбитальными обсерваториями. В настоящее время синоптических орбитальных обсерваторий в нашей стране нет, и их запуск в ближайшие годы не планируется. Поэтому остро стоит вопрос о возможности прогноза КП на основе имеющихся или перспективных средств наблюдений за солнечной активностью.

Прогноз квазистационарных потоков солнечного ветра

Солнечный ветер представляет собой плазму с вмороженным магнитным полем, потоки которой заполняют межпланетное пространство. Минимальная скорость солнечного ветра на орбите Земли составляет примерно 260 км/с, максимальная достигает значений ~750 км/с, средние величины около 400 км/с. При низкой активности, когда на Солнце нет возмущений вспышечного характера, приводящих к КВМ в межпланетную среду, так называемый спокойный солнечный ветер формирует в межпланетном пространстве квазистационарную картину. С точки зрения прогнозирования магнитных возмущений на Земле, как одной из важных составляющих космической погоды, стационарная ситуация в СВ является благоприятной, поскольку при этом проявляется тенденция к 27-дневной повторяемости событий, что используется в технологии рекуррентного прогноза.

На этом фоне медленные изменения стационарной картины связаны с эволюционными процессами, главным образом, в крупномасштабных магнитных полях на солнечной поверхности. В настоящее время мониторинг таких изменений осуществляется с помощью солнечных магнитографов фотосферного поля. Результаты наблюдений с 2015 г. в ГАС ГАО используются для прогноза параметров СВ на орбите Земли на основе полуэмпирической модели WSA [4].

На рис. 1 представлены результаты расчетов в сравнении с измеренной скоростью СВ. Получаемые при этом данные позволяют с использованием имеющихся моделей оценивать скорость и время достижения солнечным ветром выбранной точки на трассе Солнце–Земля, что соответствует возможной заблаговременности прогноза. На рис. 2 представлен пример оперативного прогноза параметров СВ на орбите Земли, выполненного по данным телескопа СТОП. Данные прогноза оперативно обновляются на сайте (http://solarstation.ru/sun-service/forecast).

Таким образом, эта составляющая прогноза КП принципиально решена при использовании уже имеющихся наблюдательных средств, хотя и требует дальнейшего совершенствования.

Оценка потоков УФ и рентгеновского излучения

Потоки солнечного излучения в диапазоне вакуумного УФ имеют важное значение для КП. Такие потоки могут оказывать существенное воздействие на верхние слои атмосферы и менять условия формирования локальных климатических систем [3; 6]. Мощные потоки жесткого излучения, особенно во время солнечных вспышек, воздействуют на технологические системы, на космические аппараты. Поток УФ, в зависимости от длины волны, варьируются от 2 до 10 раз при переходе минимума до максимума активности солнечного цикла. Для оценки квазистационарных потоков УФ излучения Солнца часто используются спектральная линия водорода Лайман-α 121,6 нм, которая является важным источником излучения в УФ диапазоне. Прямые наблюдения Солнца в таком коротком диапазоне длин волн в атмосфере Земли невозможны. Однако для оценки потоков УФ излучения используют данные наземных наблюдения в радиодиапазоне F10,7 см, индексы солнечных пятен, интенсивности солнечной короны и др. [9; 11]. Как правило, при рассмотрении долговременных вариаций такие индексы показывают высокий коэффициент корреляции. Но при рассмотрении короткопериодических вариаций (неделя или меньше), коэффициент корреляции, например, для индекса F10,7, составляет около R~0.66 [11].

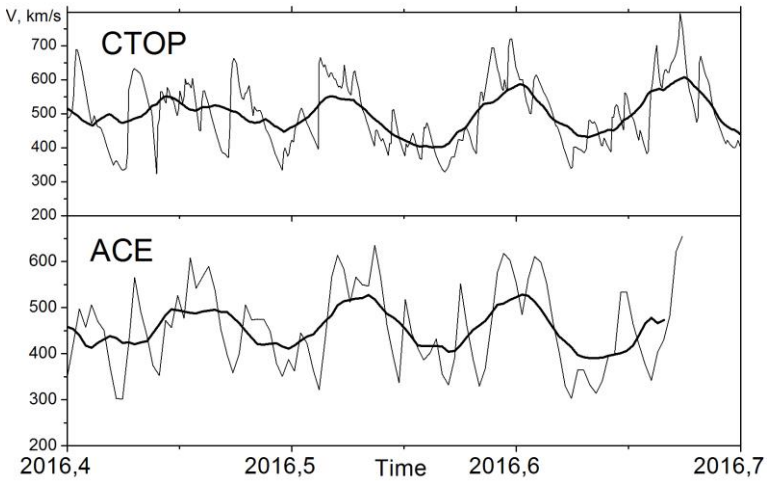


Рисунок 1**.** Сопоставление скорости СВ, усредненной за день, по данным расчетов по наблюдения в ГАС ГАО РАН (СТОР) и измеренные на спутнике ACE. Также приведены данные, сглаженные за 7 дней.

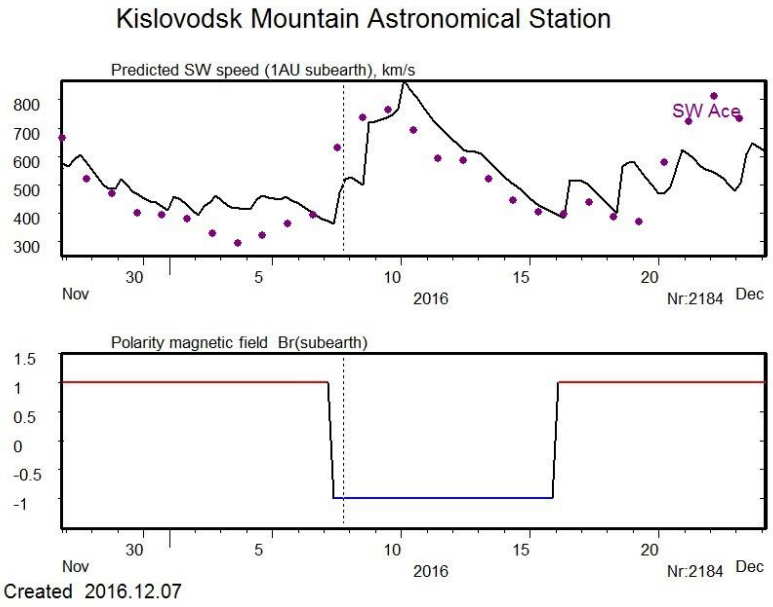


Рисунок 2. Пример оперативного прогноза скорости и полярности солнечного ветра на ГАС ГАО РАН, выполненного 07.12.2016, и его сравнение с данными наблюдений обсерватории ACE. Пунктирной линией отмечена дата прогноза.

Ранее предлагалось использовать для оценки долговременных вариаций УФ излучения долговременные серии наблюдений в линии CaIIK [10]. Однако использование фильтровых наблюдений или анализ фотопластинок, получаемых на спектрогелиографах, показали хорошее соотношение, но на временах порядка солнечного цикла активности.

Опыт эксплуатации патрульного автоматизированного телескопа-спектрогелиографа в линии CaIIK, на ГАС ГАО с 2012 г. показал, что наземные спектральные наблюдения могут эффективно использоваться для оперативной оценки мощности потоков УФ излучения. Нами выполнено сравнение между потоком УФ излучения для композитного индекса Лайман-альфа (http://lasp.colorado.edu/lisird/lya/) [12] в зависимости от площади флоккул в ядре линии CaIIK K3, для ежедневных данных за период 2012-2016 гг. Коэффициент корреляции между данными достаточно высок R=0.83, значительно выше, чем для индекса солнечных пятен SN: R=0.54. Следовательно, наблюдения в ядре линии CaIIK могут применяться для оперативной оценки фонового уровня жесткого излучения.
Потоки жесткого излучения многократно возрастают во время солнечных вспышек. В [5] было показано, что наблюдения на патрульном спектрогелиографе в линии CaIIK во время солнечных вспышек различных классов дают временные профили, близкие к данным спутников GOES. Таким образом, можно сделать вывод, что данные патрульных спектрографов могут эффективно использоваться для оценки жесткого и УФ излучения, как в спокойные периоды, так и во время солнечных вспышек.

Регистрация эруптивных событий

Корональные выбросы являются основной причиной геомагнитных бурь [4, 13], поэтому их регистрация, определение направления распространения и прогноз из влияния на Землю является одной из центральных задач космической погоды. В настоящее время существует несколько прогностических инструментов, используемых в режиме реального времени моделирования гелиосферного распространения КВМ, начиная от эмпирических методов [8], до сложных численных моделей, как, например, модель WSA-ENLIL+Cone [14]. В основе этих методов лежат входные параметры КВМ, которые оцениваются методом триангуляции. Входными параметрами являются момент эрупции, скорость, широта, долгота и полуширина конуса распространения. Основные наблюдательными данными являются данные наблюдений корональных спутниковых обсерваторий LASCO/SOHO или SECCHI/STEREO.
Вместе с тем, наземные патрульные телескопы, обеспечивающие непрерывные наблюдения с периодичностью порядка минуты, а хромосферные линии могут успешно использоваться вместо спутниковых наблюдений в УФ диапазоне. Выбор схемы спектрогелиографов, с регистрацией полного профиля спектральной линии, в качестве схемы таких телескопов, позволяет существенно повысить контраст регистрируемых эруптивных событий. Заметим, что контраст эруптивных событий, получаемых методом вычитания интенсивности в крыльях линии значительно выше, чем методом вычитания изображений в

разное время методом EUV димминга. Патрульные телескопы позволяют также регистрировать эруптивные события на лимбе Солнца и отслеживать их до высот порядка 1.3-1.4Ro.

Заключение

Наземные наблюдения солнечной активности необходимы для мониторинга Арктики.
Наземные средства наблюдений солнечной активности могут обеспечить непрерывный контроль и прогноз КП.
Телескоп-магнитограф, а также патрульные автоматизированные телескопы в линиях CaIIK и H-alpha, которые эксплуатируются на ГАС ГАО в синоптическом режиме, показали свою эффективность для мониторинга КП и определения параметров квазистационарных потоков СВ с заблаговременностью в 3-7 суток. При этом необходимо резервирование наблюдений на базе обсерваторий в Уссурийске и Иркутске, Крыма.
Патрульные оптические телескопы позволяют определять направление и скорость корональных выбросов массы, оценивать потоки жестокого и УФ излучения. Наблюдения в радиодиапазоне позволяют фиксировать момент и мощность солнечных вспышек даже при неблагоприятных метеорологических условиях.
На следующем этапе данные оперативных наблюдений должны быть включены в модели распространения возмущений от Солнца в межпланетном пространстве до орбиты Земли, получен прогноз и доведен до потребителя.
Благодарности: работа выполнена при поддержке проекта РНФ №15-12-20001.

Литература

1. Петрукович А. А., Ермолаев Ю.И., Эйсмонт Н.А. Мониторинг солнечного ветра с целью оперативного прогноза гелиофизической обстановки. // Практические аспекты гелиогеофизики./ под ред. А.А. Петруковича, А.А. Мерзлого. Москва:ИКИ РАН, С. 11-21, 2016.
2. Tlatov A.G., Pashchenko M.P., Ponyavin D.I., Svidskii P.M., Peshcherov V.S. and Demidov M.L. Forecast of Solar Wind Parameters According to STOP Magnetograph Observations. //Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.), V. 56, No. 8., P.969-975, 2016
3. Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Matthes, K., Sassi, F., van Loon, H. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing.// Science, V. 325, P. 1114, 2009
4. Arge C.N., Luhmann J.G., Odstrčil D., Schrijver C.J., Li Y. Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys., V. 66, № 15–16, P. 1295–1309, 2004.
5. Tlatov, A.G., Dormidontov, D.V., Kirpichev, R.V., Pashchenko, M.P., Shramko, *A.D.* Synoptic and fast events on the sun according to observations at the center and wings of the Ca II K line at the Kislovodsk Mountain station patrol telescope.// *Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.)*, V. 55, P. 961-968, 2015.
6. Lean, J., Beer, J., Bradley, R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. //GRL,V. 22, P. 3195-3198, 1995.
7. Woods T. N, Tobiska W. K, Rottman G.J, Worden J.R. Improved solar Lyman a irradiance modeling from 1947 through 1999 based on UARS observations. //J Geophys Res., V.105, P.27195–27216. , 2000.
8. Gopalswamy, N., Lara, A., Yashiro, S., Kaiser, M. L., Howard, R. A. Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections. //JGR, 2001106, 29207
9. Viereck, R.; Puga, L., McMullin, D., Judge, D., Weber, M., Tobiska, W.K. The Mg II index: A proxy for solar EUV. //Geophysical Research Letters, V. 28, P. 1343-1346, 2001.
10. Foukal, P., Bertello,L., Livingston, W., C.; Pevtsov, A., Singh, J.,Tlatov, A. G., Ulrich, R. K. Century of Solar Ca ii Measurements and Their Implication for Solar UV Driving of Climate. Sol. Phys., V. 255, P.229-238, 2009
11. Pap, J., Variations in solar Lyman alpha irradiance on short time scales.//Astronomy and Astrophysics, V. 264, no. 1, P. 249-259**,** 1992.
12. Webb, D. F.; Howard, T.A.; Fry,C. D.; Kuchar,T.A.; Odstrcil,D.; Jackson,B.V.; Bisi,M.M.; Harrison,R.A.; Morrill, J. S.; Howard, R. A.; Johnston, J. C. Study of CME Propagation in the Inner Heliosphere: SOHO LASCO, SMEI and STEREO HI Observations of the January 2007 Events. //Sol. Phys., V. 256, P. 239-267, 2009
13. Koskinen, H. E. J., Huttunen, K. E. J. 2006, Geoeffectivity of Coronal Mass Ejections.// SSRv, V. 124, pp. 169–181, 2006.
14. Odstrcil,D.; Riley,P.; Zhao,X.P. Numerical simulation of the 12 May 1997 interplanetary CME event.// JGR, 2004, 109, A02116

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 98-101
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.98-101

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСА СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

А.Л. Харитонов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Москва (e-mail: ahariton@izmiran.ru)

Аннотация. В настоящей работе представлены некоторые полученные результаты по математической обработке и геофизической интерпретации комплекса различных данных в некоторых районах Арктического региона, которые могут позволить проводить более качественное изучение его рифтовых и трансформных зон, влияющих на нефтегазовую перспективность примыкающих к ним районов Арктики. В качестве основных методов исследования предлагается использовать накопленный автором опыт по математической обработке и геофизической интерпретации результатов спутниковых геомагнитных векторно-компонентных съемок, выполненных с помощью космических аппаратов «MAGSAT», «CHAMP».

Abstract. This paper presents some results on mathematical processing and geophysical interpretation of a complex of different data in some areas of the Arctic region, which can allow for a better study of its rift and transform zones affecting the oil and gas prospects of the adjacent areas of the Arctic. As the main research methods, it is proposed to use the experience accumulated by the author in mathematical processing and geophysical interpretation of the results of satellite geomagnetic vector-component surveys performed using the spacecraft "MAGSAT", "CHAMP".

Используемые материалы и методы исследований

Спутниковые магнитные методы, совместно с морскими, наземными дают возможность выделить рифтовые и трансформные зоны Арктического региона и это может позволить спланировать систему проведения дальнейших геолого-геофизических исследований в этом регионе по изучению его нефтегазовых перспектив. Для изучения особенностей геолого-тектонического строения Арктического региона были использованы некоторые морские геолого-геофизические [2] и морфоструктурные (батиметрические) данные. Региональные морские геолого-геофизические исследования на российской части акватории Северного Ледовитого океана до недавнего времени проводилось в основном такими научными организациями «ВНИИокеанология» [2], ФГБУН «ААНИИ» [3], ФГБУН «ИЗМИРАН» - «ИФЗ РАН» [5], ОАО «СЕВМОРГЕО» и другие, с помощью геофизической аппаратуры, установленных на дрейфующих полярных станциях «Северный полюс-19» - «Северный полюс - 31» [5] и вдоль одиночных арктических геотраверсов измерений магнитного поля на ледоколах «Арктика-2000», «Арктика-2005», «Арктика-2007», а также с помощью полярной авиации вдоль некоторой сети профилей (рис. 1).

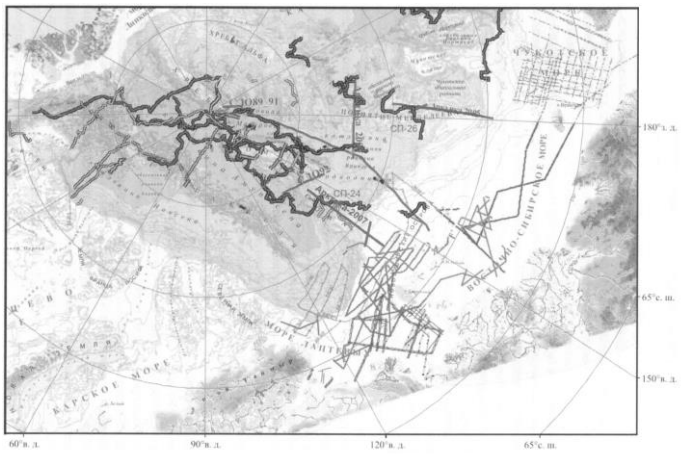


Рисунок 1. Схема проводимых геолого-геофизических исследований на акватории Северного Ледовитого океана в российском секторе Арктического региона: с помощью научных станций, расположенных на дрейфующих льдах «Северный полюс - СП», которые обозначены толстыми кривыми; серыми линиями выделены геотраверсы ледокола «Арктика»; светло-серыми линиями показана сеть маршрутов аэромагнитных съемок в пределах Северного Ледовитого океана [2].

К сожалению даже самые мощные и лучшие в мире отечественные ледокольные суда с атомным двигателем могут относительно свободно перемещаться в пределах Северного Ледовитого океана лишь в осенне-летний период, в благоприятные годы. Поэтому только аэромагнитные [4] и спутниковые магнитные съемки [5] могут осуществлять бесперебойные всесезонные длительные повторные измерения (в течение нескольких лет) всех ортогональных (H, D, Z) составляющих геомагнитного поля, которые можно использовать для изучения регионального тектонического [6] строения коры этого очень перспективного Арктического региона. В современных условиях самыми оперативными и относительно недорогими отечественными геолого-геофизическими методами на акваториях Арктического региона могут быть спутниковые магнитные методы. Пример выделения интенсивных региональных электромагнитных аномалий и трассирования по ним рифтовых зон и трансформных разломов в пределах Арктического нефтегазового бассейна по данным космического аппарата «MAGSAT» приведен на рис. 2.

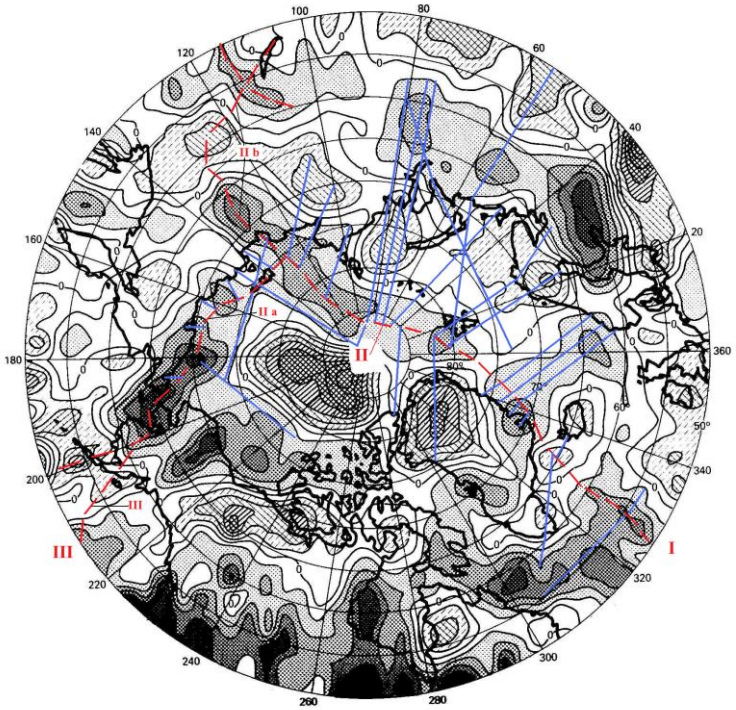


Рисунок 2. Аномалии электромагнитного поля (аномалии вектора индукции так называемого «постоянного» электромагнитного поля Земли) Арктического нефтегазоносного бассейна по данным космического аппарата «MAGSAT». Жирная линия показывает положение береговой линии. Изолинии магнитного поля проведены через 2 нТл. Аномалии постоянного электромагнитного поля, осредненные по сетке 5 х 5 градусов, заштрихованные темным цветом, соответствуют положительным значениям аномального электромагнитного поля, а светлыми тонами отмечены отрицательные аномалии электромагнитного поля [1, 4, 6]. I – расположение Атлантической ветви мировой океанической рифтовой системы срединно-океанических хребтов, IIa – расположение Чукотско-Беринговоморской Арктической ветви мировой океанической рифтовой системы срединно-океанических хребтов, IIb – расположение Арктической ветви континентальной Верхоянской рифтовой системы, III – расположение Тихоокеанской ветви мировой океанической рифтовой системы срединно-океанических хребтов. Синим цветом выделены глубинные трансформные разломные зоны (линеаменты) Арктической рифтовой системы.

Для математической обработки и геофизической интерпретации аэрокосмических данных была разработана система компьютерных программ (рис. 3), включающая различные современные спектральные [7], корреляционные [8] и другие методы анализа измеренных цифровых данных, позволяющие исключать ошибки измерений и разделять измеренное магнитное поле на составляющие, связанные с различными физическими источниками в разных геосферах Земли.

Для надежной математической обработки спутниковых магнитных измерений в Арктическом регионе часто необходимо использовать данные субширотной цепочки наземных магнитных обсерваторий, расположенных на территории Российской Федерации, вдоль Северного морского пути. В основном пока нами используются данные низкоорбитальных космических аппаратов (КА) «CHAMP» [10], «MAGSAT» [1], измеряющих значения ортогональных компонент вектора электромагнитного поля над всей поверхностью Арктического

региона и, в частности, над труднодоступной для других видов геофизических измерений территорией, в пределах акватории Северного Ледовитого океана. Данные о положении полосовых палеомагнитных (рифтовых) аномалий в Восточно-Сибирском море [9] не противоречат нашим спутниковым магнитным и морфоструктурным данным о положении глубинных трансформных разломов Арктической рифтовой системы срединно-океанического хребта Северного Ледовитого океана (рис. 4).



Рисунок 3. Блок-схема пакета компьютерных программ, используемых для математической обработки и геофизической интерпретации спутниковых геомагнитных данных [4, 6, 8].

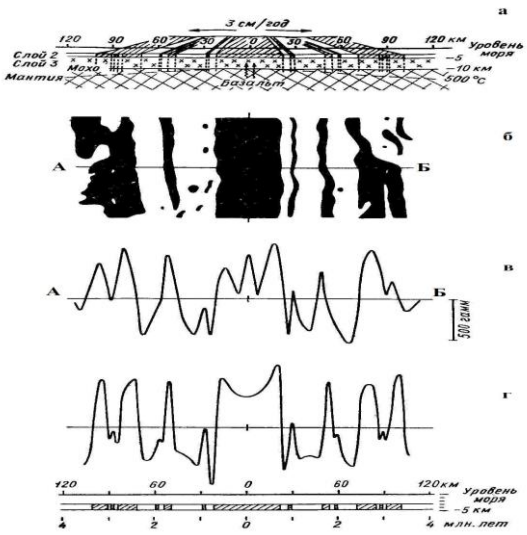


Рисунок 4. Реальные и модельные аэромагнитные аномалии над районом рифтового океанического хребта Гаккеля [9]: а – схема океанического рифтового хребта (зоны спрединга) в разрезе, б – план-схема зоны линейных перемежающихся (положительных и отрицательных) палеомагнитных (полосовых) аномалий (Та) над зоной спрединга, в – график измеренных линейных палеомагнитных (полосовых) аномалий (Та), г – график модельных линейных палеомагнитных (полосовых) аномалий (Та).

В результате можно сказать, что в настоящее время именно хребет Гаккеля, а не хребет Ломоносова является современной Арктической рифтовой зоной (зоной спрединга) срединно-океанического хребта Северного Ледовитого океана. Системой выделенных нами крупных трансформных разломов (№ 1 - № 10) Арктического рифта образованы перспективные зоны для поисков нефтяных и газовых месторождений в конусах выноса Российских рек на шельфе Северного Ледовитого океана (рис. 5).

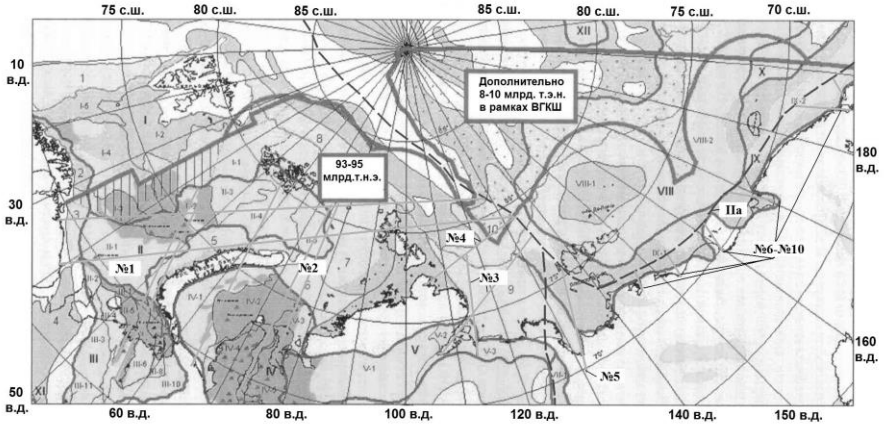


Рисунок 5. Карта перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Северного Ледовитого океана [2] с наложенной на нее системой выделенных нами трансформных разломов Арктической рифтовой системы [4]. Темно-серым цветом выделены высокоперспективные зоны, серым цветом выделены умеренно перспективные зоны для поисков месторождений углеводородов. Светло-серыми прямыми линиями обозначены зоны трансформных рифтовых разломов (№ 1 – Кольские, № 2-Обско-Ямальские, № 3 - Хатангские, № 4 – Таймырский, № 5 - Янский, № 6-10 – Хромский, Индигирский, Колымский и др.) связанных с осевой зоной Арктической рифтовой системы (IIa) (зоны спрединга) Северного Ледовитого океана (пунктир).

Заключение

Полученные результаты спутниковых магнитных исследований могут быть использованы при поисках и разведке новых нефтегазоносных регионов на шельфе Северного Ледовитого океана. Выделенная нами новая Чукотско-Беринговоморская рифтовая зона Арктики, по-видимому генерирует процессы активного тепломассопереноса вещества к поверхности океанической коры, и приводит к ускорению процессов вертикальной миграции газообразных углеводородов через зоны трансформных разломов в верхнекоровые «ловушки» углеводородов, что привело к образованию новых месторождений нефти и газа, сформированных в течение последних нескольких десятков миллионов лет.

Литература

1. Langel R.A., Berbert J., Jennings T., Horner R. MAGSAT data processing: a report for investigators // Technical Memorandum 82160, NASA, 1981, 328 p.
2. Каминский В.Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна // Автореферат на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. С-Петербург, 2009, 47 с.
3. Салихов З.С., Арабский А.К., Кузнецов В.Д., Зайцев А.Н., Петров В.Г., Фомичев В.В., Трошичев О.А., Янжура А.С. Система контроля космической погоды для оценки технологических рисков на территории полуострова Ямал // Наука и техника в газовой промышленности. 2010, № 4, с. 39-48.
4. Харитонов А.Л. Совместная интерпретация комплекса различных геолого-геофизических данных для изучения глубинного строения Арктического региона // В сб. «Сейсмические технологии-2017» Материалы научно-практической конференции. ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ им. М.В. Ломоносова», 2017, с. 159-162.
5. Трофимов И.Л., Шнеер В.С., Халезов А.А. Аномальное магнитное поле хребта Ломоносова по данным дрейфующей станции “Северный полюс-19” // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 46, № 2, 2006, с. 275-279.
6. Харитонов А.Л. Программное обеспечение для технологии спутникового мониторинга и прогнозирования аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса // Материалы 5-ой научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение», МГУ им. М.В.Ломоносова, 2016, CD.
7. Ротанова Н.М., Харитонов А.Л., Ан Ченчанг. Спектральный анализ магнитного поля, измеренного на спутнике МАГСАТ // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 39, № 3, 1999, с. 101-107.
8. Kharitonov A.L. Interpretation of magnetic body parameters, using spectral analysis of the anomalous magnetic field // HHI-Report, Berlin, No 21, 1987, pp. 99-106.
9. Вакье В. Геомагнетизм в морской геологии. Л.: Недра, 1976. 192 с.
10. Holme R., Luhr H., Maus S., Olsen N., Ritter P., Rother M., Scwarte J. Magnetic field modeling with CHAMP data: initial results, GP61A-06, AGU, Fall Meeting, 2000.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 102-105
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.102-105

АВРОРАЛЬНЫЙ ОВАЛ И ОВАЛ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

С.А. Черноус[1], И.И. Шагимуратов[2], В.В. Алпатов[3], М.В. Филатов[1], П.А. Будников[3], И.И. Ефишов[2], Ю.В. Федоренко[1]

[1]*Полярный Геофизический Институт, Мурманск, Апатиты (e-mail: chernouss@pgia.ru)*

[2]*Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград*

[3]*Институт Прикладной Геофизики имени академика Е.К. Федорова, г. Москва*

Аннотация. В работе приводится описание проведенных экспериментальных исследований взаимосвязи возмущений авроральной зоны и изменений полного электронного содержания (ПЭС) по данным приема трансионосферных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в высоких широтах. Анализируется состояние ионосферы по данным станций высокоорбитальной радиотомографии ФГБУ «ИПГ»Росгидромета. Обнаружено сходство вариаций временных рядов развития активности авроральных суббурь и вариаций ПЭС.

Abstract. The paper describes the experimental studies of the relationship between disturbances of the auroral zone and changes in the total electronic content (TEC) according to data received from the trans-ionospheric signals of global navigation satellite systems (GNSS) at high latitudes. The state of the ionosphere is analyzed according to the high-orbital radio tomography stations of the Fedorov Applied Geophysics Institute. The similarity of variations in the time series of the development of auroral activity and TEC variations was found.

Материалы и методы

Исходными данными работы послужили измерения параметров сигнала отдельных пролетов навигационных спутников и наблюдения авроральной активности при помощи оптических и магнитных измерений (1-5)
Для каждого спутника рассчитывались степень изменение полного электронного содержания (ПЭС), степень изменчивости электронного содержания - индекс RoTI и индекс сцинтилляции S4. Одновременные наблюдения за сигналами ГНСС и авроральными возмущениями, проводились на станциях, расположенных приблизительно вдоль меридиана от Санкт-Петербурга до Тромсе. В частности, рассматривается большая магнитная буря 17-18 марта 2015 года, когда полярные сияния наблюдались от полярных областей до 55-60º географической широты Анализируется состояние ионосферы по данным станций высокоорбитальной радиотомографии ФГБУ «ИПГ» Росгидромета (7-9) за выбранные периоды.

Результаты и обсуждение

Обнаружено сходство вариаций временных рядов развития активности авроральных суббурь и вариаций полного электронного содержания. Интенсивность, как флуктуаций ПЭС, так и магнитных возмущений уменьшались по типу авроральной суббури как на северных станциях, так и на средних широтах. В ходе анализа выявлена зависимость ошибок позиционирования от степени возмущенности полярной ионосферы. Изображения пространственного распределения флуктуаций ПЭС (RoTI) в координатах CGL и MLT, построенные с помощью непрерывных измерений сигналов ГНСС на отдельных станциях, демонстрируют пространственную структуру, аналогичную овалу полярных сияний.
На рисунке 1 приведены траектории пролетов навигационных спутников в координатах азимут – угол места, а на рисунке 2 - вертикальные ROTI, рассчитанные по параметрам принимаемого на поверхности Земли их сигнала 17 марта 2015 года. Очевидно, что максимального развития флуктуации ПЭС достигают практически синхронно с развитием аврорального электроджета, характеризуемого на рисунке 3 индексом AE.
На рисунках 4 и 5 приводятся расчетное положение аврорадьного овала по модели SVALTRACK-2,(6), основанной на экспериментальной модели овала советских ученых (левая часть рисунков) и двумерная карта значений ROTI (7) по данным сети станций РОСКОМГИДРОМЕТА (правая часть рисунков) при различной геомагнитной активности. Сопоставление приведенных рисунков демонстрирует смещение как аврорального овала, так и «овала» ионосферных флуктуаций к экватору при росте геомагнитной активности. Авторы предполагают, что полученные результаты указывают на то, что аналогичные результаты могут иметь место даже в средних широтах во время больших магнитных бурь при экваториальном смещении аврорального овала.

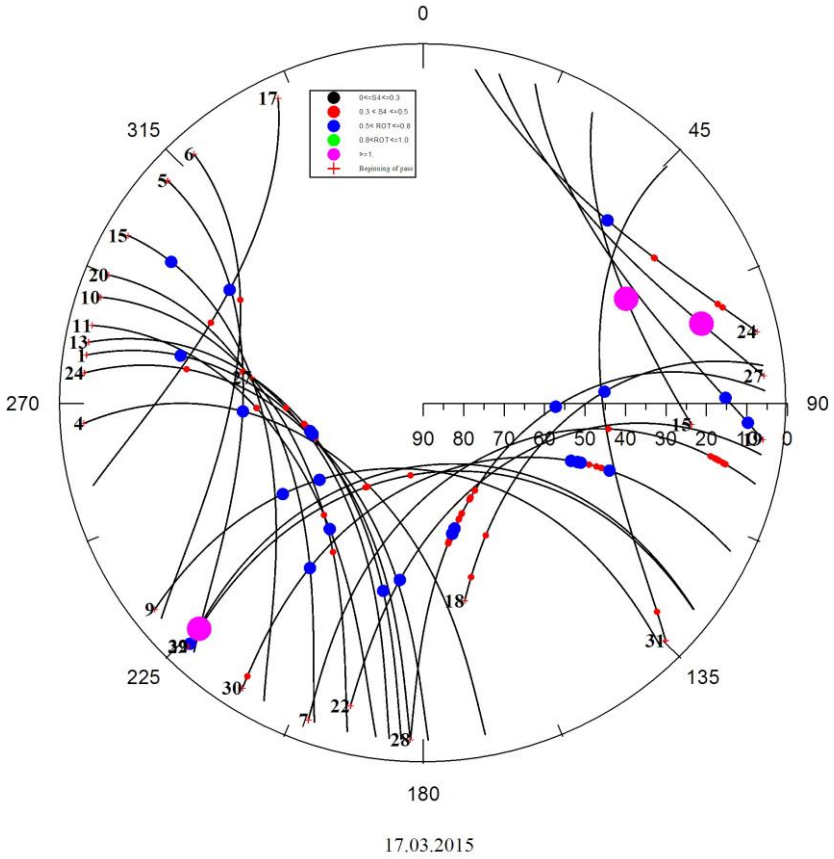


Рисунок 1. Пролеты высокоапогейных навигационных спутников в угловых координатах 17 марта 2015 г. В кругу на начало пролета поставлен номер спутника.

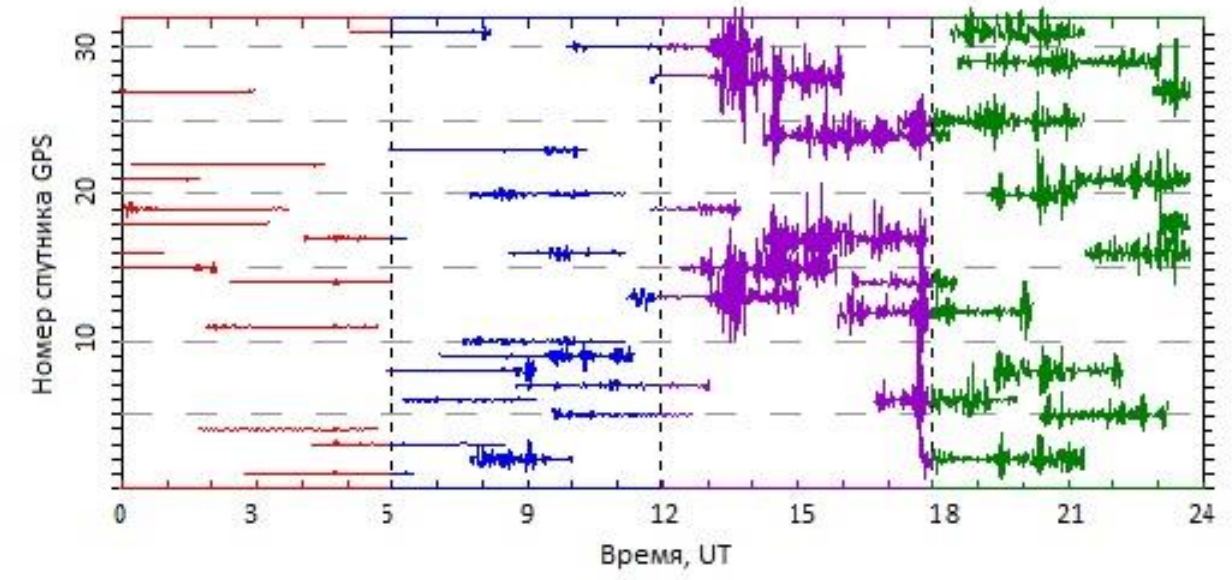


Рисунок 2. ROTI, восстановленный по сигналам от каждого спутника навигационной системы 17 марта 2015 г.

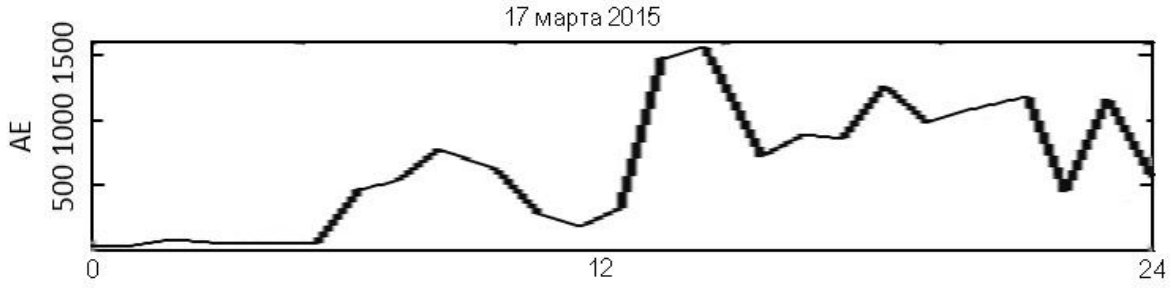


Рисунок 3. Вариации AE индекса 17 марта 2015 г.

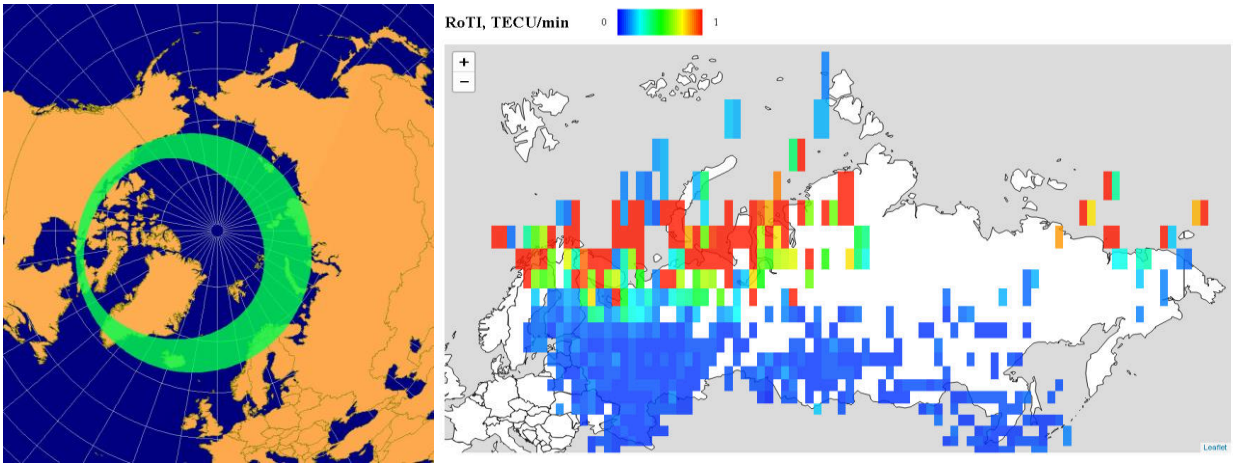


Рисунок 4 Модель аврорального овала при Кр=3 и пространственно-временное распределение ROTI (25 августа 2018г. 20:00 UT) по данным сети станций радиотомографии, соответствующее такому значению Кр.

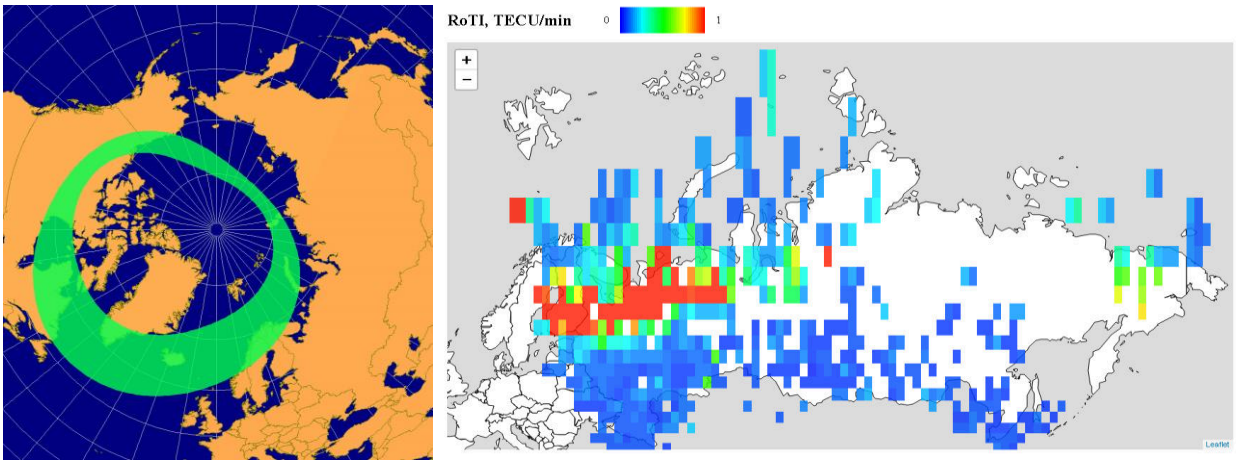


Рисунок 5 Модель аврорального овала при Кр=6 и пространственно-временное распределение ROTI (26 августа 2018г. 02:00 UT) по данным сети станций радиотомографии, соответствующее такому значению Кр.

Заключение

В работе приводится описание проведенных экспериментальных исследований взаимосвязи геофизических возмущений авроральной зоны и изменений полного электронного содержания (ПЭС) по данным приема трансионосферных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в высоких широтах. Анализируется состояние ионосферы по данным станций высокоорбитальной радиотомографии ФГБУ «ИПГ» Росгидромета. Обнаружено сходство вариаций временных рядов развития активности авроральных суббурь и

вариаций ПЭС и их пространственного распределения, что ведет нас к к численному определению ошибок и погрешностей позиционирования и построению модели прогноза условий навигации в Арктике при различной гелиогеофизической обстановке.

Литература

1. Chernouss S. A., Kalitenkov N.V.,. The dependence of GPS positioning deviation on auroral activity, International Journal of Remote Sensing, 32(1), 3005-3017(2011).
2. Kalitenkov N. V., V. I. Milkin, E. D. Tereschenko, S. A. Chernouss. // Method of location object. Abstract of invention. RU 2484494 C1., 07.11.2011.
3.S.A. Chernous, M.V. Shvets, M.V. Filatov, I.I. Shagimuratov, N.V. Kalitenkov Russian Journal of Physical Chemistry B, 2015, Vol. 9, No. 5, pp. 778–784. Pleiades Publishing, Ltd., 2015.
4. Черноус С.А., Шагимуратов И.И., Иевенко И.Б., Филатов М.В., Ефишов И.И., Швец М.В., Калитенков Н.В. Авроральные возмущения как индикатор воздействия ионосферы на навигационные сигналы // ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 37 №5 с.77-83 2018г. DOI: 10.7868/S0207401X18050102
5. S.A. Chernouss, I.I. Shagimuratov, V.V. Alpatov, I.I. Efishov, M.V. Filatov, P.A. Budnikov, Yu.S. Ivanov Auroral activity and GPS positioning during great geomagnetic storms // Astronomy and space physics in the Kyiv university Book of Abstracts May29 – June 01 2018 p.93-94,
6. F. Sigernes, M. Dyrland, P. Brekke, S. Chernouss, D.A. Lorentzen, K. Oksavik, and C.S. Deehr, Two methods to forecast auroral displays, Journal of Space Weather and Space Climate (SWSC), Vol. 1, No. 1, A03, DOI:10.1051/swsc/2011003, 2011b.
7. И.М. Алешин, В.В. Алпатов, А.Е. Васильев, С.С. Бургучев, К.И. Холодков, Ф.В. Передерин Опыт создания оперативной службы сбора данных сети наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем *вестник краунц. науки о земле. 2015. № 1. выпуск № 25, .1-4.*
8. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 548-553.
9. S. Chernous, P. Budnikov, I. Shagimuratov, V. Alpatov, M. Filatov, I. Efishov and N.Tepenitsina, Variations of GNSS signals in Euro-Arctic region during auroral Activity,45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, 27-31 August 2018, Kiruna, Sweden, p.10

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 106-109
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.106-109

МАГНИТНЫЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЧАСТОТОЙ 8 ГЦ НА ПОВЕДЕНИЕ И ДВИГАТЕЛЬНУЮ АКТИВНОСТЬ СЕРОГО ТЮЛЕНЯ

А.П. Яковлев[1], В.Ф. Григорьев[2]

[1]*Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Мурманск, (e-mail:xloroplast@mail.ru)*
[2]*Полярный Геофизический Институт, Мурманск*

Аннотация. Выявлены биологические магнитные эффекты, возникающие в ответ на экспозицию серого тюленя в искусственном электромагнитном поле с частотой 8 Гц: двигательная активность серого тюленя значительно возрастает именно в период экспозиции в электромагнитном поле, резко снижаясь после прекращения воздействия; животное практически полностью избегает выходов на сушу; время, проведенное тюленем на суше, на порядок меньше, чем в экспериментах с плацебо-контролем и при фоновых наблюдениях.

Abstract. The biological magnetic effects arising in response to the exposure of the grey seal in an artificial electromagnetic field with a frequency of 8 Hz were revealed: the physical activity of the grey seal significantly increases during the exposure in the electromagnetic field, sharply decreasing after the termination of exposure; the animal almost completely avoids landfall; the time spent by the seal on land is much less than in experiments with placebo control and background observations.

Материалы и методы

В качестве объекта для проведения экспериментальных исследований, была выбрана половозрелая самка (возраст 12 лет) серого тюленя (*Halichoerus grypus* Fabricius, 1791).
Данные полученные в ходе проведения эксперимента были получены при помощи «метода сплошного протоколирования» и «метода регистрации отдельных поведенческих проявлений» [1]. В качестве количественной оценки двигательной активности животного использовался «индекс активности», а так же количественные показатели – среднее число кругов под водой и среднее время, которое затрачивает тюлень на совершение одного круга [2].

Результаты и обсуждение

Рассчитанный показатель количества всплытий в минуту является средним значением от числа всплытий, совершаемых животным за определенный промежуток времени наблюдения. Нахождение тюленя на поверхности воды связано с физиологически необходимым актом дыхания, и поскольку подобные поведенческие проявления являются постоянными, они наиболее полно отражают двигательную активность животного в данный промежуток времени. Высокая двигательная активность животного характеризуется повышением потребления кислорода. Существует прямая зависимость увеличения потребления кислорода от роста интенсивности протекания физиологических процессов в организме животного [3].
На рисунке 1 показано среднее количество всплытий за минуту в серии 7-часовых экспериментов с генерируемым электромагнитным полем с частотой 8 Гц. Двигательная активность тюленя начала расти сразу после включения электромагнитного поля, в течение первого часа наблюдений. На протяжении последующих двух часов воздействия активность животного продолжила расти. Животное активно плавало по периметру бассейна, совершая кратковременные всплытия для дыхания продолжительностью 1–2 секунды. В течение четвертого часа экспозиции животное стало совершать более длительные всплытия, находясь на поверхности 7–10 секунд, интервал между всплытиями сократился, скорость движения и показатель всплытий за 1 минуту снизились. Двигательная активность животного уменьшилась почти в 1,5 раза, по всей видимости, это обусловлено физическим утомлением по причине практически безостановочного активного плавания в течение трех часов экспозиции. Однако начиная с пятого часа экспозиции и до конца воздействия электромагнитного поля двигательная активность вновь стала постепенно возрастать. Оценка по U-критерию Манна – Уитни полученных значений количества всплытий за 1 минуту для каждого из 7 часов воздействия в 5 проведенных экспериментах показала достоверные различия этих значений, при $p < 0,05$.

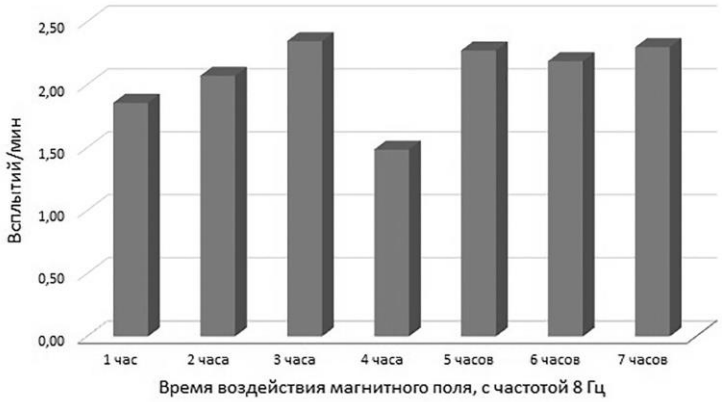


Рисунок 1. Среднее количество всплытий, совершаемых животным за 1 минуту в экспериментах с генерируемым электромагнитным полем с частотой 8 Гц.

Плацебо-контроль показал, что при работающем оборудовании, но отсутствии генерации электромагнитного поля тюлень не проявляет такой активности, как в экспериментах с генерацией электромагнитного поля (рис. 2 А). Количество всплытий за минуту в течение 4 часов наблюдения незначительно колеблется, при этом находится на низком уровне (0,22–0,30 всплытий/мин).

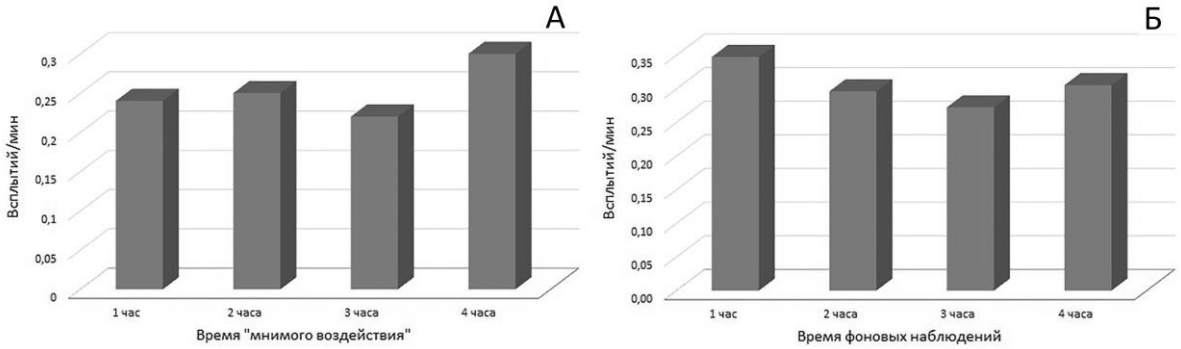


Рисунок 2. Среднее количество всплытий, совершаемых животным за 1 минуту в экспериментах с: А - плацебо-контролем; Б – фоновых наблюдениях.

Фоновые наблюдения (рис. 2 Б) показали, что двигательная активность серого находится на стабильно низком уровне, количество всплытий незначительно варьируется и составляет от 0,27 до 0,31 всплытий/мин.
Сравнение по U-критерию Манна – Уитни полученных значений количества всплытий за 1 минуту в экспериментах с воздействием электромагнитного поля с частотой 8 Гц с материалом экспериментов с плацебо-контролем и во время фоновых наблюдений выявило достоверные различия ($U_{Критическое} = 1$; $U_{Эмпирическое} = 0$) всех данных, при $p < 0,05$. Аналогичное сравнение результатов экспериментов с плацебо-контролем и фоновых наблюдений, достоверных различий для параметра всплытий за 1 минуту не показало ($U_{Кр} = 0$; $U_{Эмп} = 1,5$), при $p < 0,05$.
Нами было рассчитано процентное отношение времени, проведенного тюленем под водой, на поверхности и на помосте, к общему времени наблюдения для каждой серии экспериментов (рис. 3).

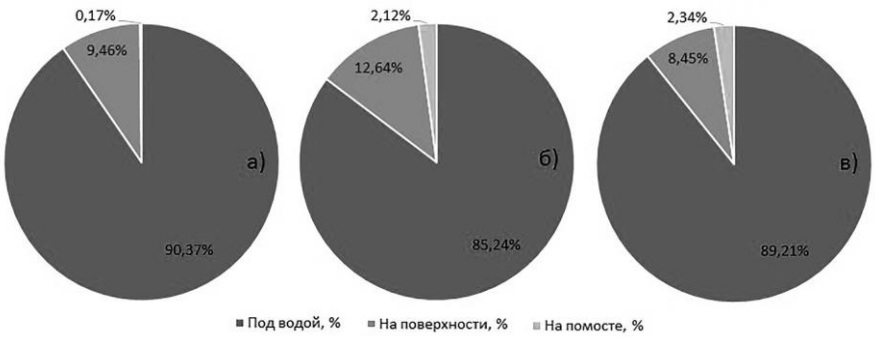


Рисунок 3. Процентное отношение времени, проведенного тюленем под водой, на поверхности и на помосте, к общему времени наблюдения: а – эксперименты с генерацией электромагнитного поля с частотой 8 Гц; б – эксперименты с плацебо-контролем; в – фоновые наблюдения.

Оказалось, что при фоновых наблюдениях и в экспериментах с плацебо-контролем фиксируются довольно частые выходы тюленя на помост, а время, проведенное им на помосте, достигает 2,12 % от общего времени наблюдения в эксперименте с плацебо-контролем и 2,34 % при фоновых наблюдениях. Напротив, при экспозиции животного в электромагнитном поле с частотой 8 Гц общее время, проведенное им на помосте, составило всего 0,17 % от общего времени наблюдения.

По всей видимости, такая картина может быть связана с тем, что ластоногие на суше менее подвижны, чем в воде. Обычно тюлени реагируют на приближение наземного хищника или человека уходом в воду. Такая реакция животных говорит о том, что водная среда является для ластоногих более безопасной относительно наземной, в воде они имеют больше шансов уйти от опасности или неблагоприятного внешнего фактора [4].

Время, проведенное тюленем под водой и на поверхности, незначительно варьировалось в экспериментах с генерацией электромагнитного поля и при плацебо-контроле, а также при фоновых наблюдениях (рис. 3). Процентное соотношение времени, проведенного под водой и на поверхности, не в полной мере отражает реальную картину двигательной активности животного. Количественная оценка двигательной активности необходима для получения объективных данных при определении влияния различных факторов на поведение тюленей. Для более полного представления о количественных характеристиках уровня двигательной активности тюленей было введено понятие «индекс активности» – отношение проявления активности к ее отсутствию [5]. Для количественной оценки двигательной активности был проведен учет частоты выполнения определенных движений за фиксированный промежуток времени (движение по круговым траекториям) и времени зависания на поверхности и в толще воды.

В экспериментах с воздействием на тюленя электромагнитного поля с частотой 8 Гц были проведены наблюдения непосредственно перед экспозицией, во время и после нее, что позволило проследить динамику изменения индекса активности и количественных параметров двигательной активности, а также сравнить полученные результаты с данными фоновых наблюдений и экспериментов с плацебо-контролем (табл. 1).

Таблица 1. Индекс активности и количественные показатели двигательной активности серого тюленя до, во время и после экспозиции в электромагнитном поле, во время фоновых наблюдений и экспериментов с плацебо-контролем.

	Число наблюдений	Время, %		Индекс активности	Среднее число кругов за 1 минуту	Среднее время на 1 круг, с
		Зависание на поверхности и в толще воды	Движение по круговым траекториям			
До воздействия ЭМП	134	31,63	68,37	2,2	4,1±0,2	10,7±0,5
Во время экспозиции в ЭМП	156	13,06	86,94	6,7	7,6±0,4	6,8±0,3
После воздействия ЭМП	183	27,39	72,61	2,7	4,6±0,3	9,5±0,7
Плацебо-контроль	165	38,24	61,76	1,6	4,6±0,2	11,5±0,5
Фоновые наблюдения	181	45,80	54,20	1,2	2,9±0,3	11,3±0,8

В период наблюдения до воздействия электромагнитного поля индекс активности и среднее число кругов, совершаемых тюленем за 1 минуту, имели достаточно низкие значения. Во время экспозиции тюленя в электромагнитном поле с частотой 8 Гц индекс активности вырос более чем в 3 раза, среднее число кругов за 1 минуту возросло практически в 2 раза. Рост индекса активности и увеличение числа кругов при сокращении времени на их совершение говорит о резком повышении двигательной активности, что можно связать с возникшим на фоне воздействия электромагнитного поля беспокойством животного и тревожным реагированием на это воздействие.

В период после воздействия электромагнитного поля наблюдалось резкое снижение индекса активности практически до первоначального уровня, также уменьшилось среднее количество кругов, совершаемых тюленем за 1 минуту, и увеличилось время, затрачиваемое на их выполнение. Такая динамика индекса активности и количественных параметров двигательной активности свидетельствует о достаточно интенсивном характере влияния экспозиции в электромагнитном поле с частотой 8 Гц на серого тюленя. При этом изменения в поведении наблюдаются именно во время экспозиции, резко угасая после прекращения воздействия электромагнитного поля.

Сравнение распределений значений индекса активности и среднего количества кругов, совершаемых тюленем за 1 минуту, для периодов до воздействия электромагнитного поля – во время воздействия электромагнитного поля, во время воздействия электромагнитного поля – после воздействия электромагнитного поля и до воздействия электромагнитного поля – после воздействия электромагнитного поля по U-критерию Манна – Уитни в экспериментах с генерацией электромагнитного поля с частотой 8 Гц выявило достоверные различия ($U_{Кр} = 4$; $U_{Эмп} = 0$) всех полученных данных, при $p < 0,05$.

В экспериментах с плацебо-контролем и при фоновых наблюдениях индекс активности находился на низком уровне и составил 1,6 и 1,2 соответственно, что сопоставимо с индексом активности животного во время наблюдений в период до воздействия электромагнитного поля. Среднее число кругов за 1 минуту и время, затрачиваемое на их совершение, также находятся в сопоставимых диапазонах, исключая период воздействия электромагнитного поля и период после воздействия (табл. 1).

При оценке достоверности различий распределений значений индексов активности и среднего числа кругов, совершаемых тюленем за 1 минуту в экспериментах с воздействием электромагнитного поля с частотой 8 Гц, при плацебо-контроле и при фоновых наблюдениях, по U-критерию Манна – Уитни достоверно различаются данные, полученные в экспериментах с воздействием электромагнитного поля и с плацебо-контролем ($U_{Кр}$ = 1; $U_{Эмп}$ = 0), и в экспериментах с воздействием электромагнитного поля и при фоновых наблюдениях ($U_{Кр}$ = 1; $U_{Эмп}$ = 0), при $p < 0,05$. В экспериментах с плацебо-контролем и при фоновых наблюдениях достоверных различий распределений полученных данных не обнаружено ($U_{Кр}$ = 0; $U_{Эмп}$ = 0,5), при $p < 0,05$.

Таким образом, количественные характеристики двигательной активности и индекс активности дают более детальную картину поведения животного в период наблюдения за ним как во время экспериментов, так и во время фоновых наблюдений.

Заключение

Проведенные эксперименты выявили следующие магнитные биологические эффекты, возникающие в ответ на экспозицию серого тюленя в искусственном электромагнитном поле с частотой 8 Гц:

– наблюдается рост количества всплытий за 1 минуту в 5–6 раз относительно экспериментов с плацебо-контролем и фоновыми наблюдениями;

– отмечено практически полное избегание животным выходов на помост, а общее время, проведенное тюленем на нем, за весь период наблюдений составляет 0,17 %, что в 14 раз меньше, чем в экспериментах с плацебо-контролем и при фоновых наблюдениях;

– индекс активности и среднее количество кругов, совершенное тюленем, значительно выше, а время, затраченное на выполнение одного круга, значительно ниже, чем при фоновых наблюдениях, в экспериментах с плацебо-контролем и при наблюдениях непосредственно до воздействия электромагнитного поля.

Проведенные эксперименты показали, что при воздействии на серого тюленя искусственного электромагнитного поля на частотах шумановского резонанса резко возрастает его двигательная активность. Подобное поведение можно объяснить тревожным реагированием животного в ответ на экспозицию в электромагнитном поле.

Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что естественные электромагнитные поля в области частот шумановского резонанса, возбуждаемые при многих опасных гидрометеорологических процессах и магнитных бурях, способны вызывать у серых тюленей изменения в поведении и двигательной активности, то есть создают магнитные биологические эффекты. Биологическая роль подобных эффектов состоит в том, что позволяет ластоногим избегать опасных процессов, способных влиять на их жизнедеятельность, а также позволяет им регулировать свою биоритмику.

Литература

1. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф. 2016. *Устройство для исследования влияния искусственного электромагнитного поля на водные биологические объекты: Патент на полезную модель № 166414 Российской* Федерации*, МПК51* G 01 R *1/00 (2006/01).* Заявитель и патентообладатель ФГБНУ Полярный геофизический институт, № заявки 2016125093. Заявл. 22.06.2016, опубл. 27.11.2016. Бюл. № 33.

2. Попов С.В., Ильченко О.Г. 1990. *Методические рекомендации по этологическим наблюдениям за млекопитающими в неволе*. М., Московский зоопарк: 77 с.

3. Начала физиологии. 2002. СПб., Лань: 1088 с.

4. Tyack P.L. 2002. Behavior. In: *Encyclopedia of marine mammals*. W.F. Perrin, B. Würsig, J.G.M. Thewissen (eds.). California, Academic Press San Diego: 87–94.

5. Кавцевич Н.Н., Михайлюк А.Л., Березина И.А., Юрко А.С. 2007. Экспериментальное изучение поведения тюленей. В кн.: *Экспериментальные исследования морских млекопитающих в условиях Кольского залива*. Под. ред. Г.Г. Матишова. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 194–230.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 110-113
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.110-113

ДРЕЙФУЮЩАЯ СТАНЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ “СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС”

В.Г. Янке[1], Ю.В. Балабин[2], Ю.П. Очелков[3]

[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова (ИЗМИРАН), Москва (e-mail: yanke@izmiran.ru)*
[2]*Полярный Геофизический Институт, Мурманск, Апатиты*
[3]*Институт прикладной геофизики (ИПГ), Москва*

Аннотация. Обсуждаются новые задачи при непрерывном мониторинге космического излучения на дрейфующей станции космических лучей на базе платформы “Северный полюс”. При использовании гелиевых счетчиков приводится вариант переформатирования нейтронного супермонитора для увеличения его эффективности в 1.5÷2.5 раза.

Abstract. New tasks are discussed with continuous monitoring of cosmic radiation at a drifting station of cosmic rays on the basis of the North Pole platform. When using helium counters, the option of reformatting a neutron supermonitor is given in order to increase its efficiency by 1.5 ÷ 2.5 times.

Введение

С 1937 года практически регулярно проводятся полярные комплексные экспедиции "Северный полюс" на дрейфующих ледяных платформах. Несмотря на то, что платформа представляет собой многокилометровые льдины толщиной в несколько метров, одной из наиболее частых причин прекращения экспедиции является раскол платформы и ее разрушение. Более того, глобальные процессы изменения климата, в том числе и постепенно уменьшающаяся толщина льда, приводят к появлению объективных трудностей для организации таких наблюдений.



Рисунок 1. Всесезонная самодвижущаяся платформа https://www.5-tv.ru/news/201503 «Северный полюс».

Возможен другой путь – создание всесезонной научно-исследовательской самодвижущейся платформы арктического класса для круглогодичных экспедиций. Идею дрейфа на таком судне и даже достижения Северного полюса выдвинул в 1890 году Нансен, который в 1893 году даже попытался реализовать ее на специально построенном судне “Фрам”, но не достиг полной победы.

В России такую платформу планируется построить к 2020 году (рис.1). Появление современной платформы «Северный полюс» позволит перевести изучение Арктики на качественно новый уровень и создать максимально благоприятные и безопасные условия работы для исследователей. При создании экспериментальной базы, платформу «Северный полюс» планируется оснастить более полусотней различных бортовых и выносных геофизических детекторов, в том числе и нейтронным супермонитором, размещенном в стандартном 20-футовом железнодорожном контейнере на верхней кормовой палубе судна (рис.1).

Возможности детектора как полярной станции

Какие открываются новые возможности при непрерывном мониторинге космического излучения в акватории северного ледовитого океана по маршрутам дрейфующей станции?

С точки зрения мониторинга космических лучей следует различать мониторинг в области полярных широт (только Thule в северном и McMurdo/Jang Bogo в южном полушарии) и мониторинг в области высоких широт. В первом случае детектор космического излучения находится вблизи магнитного полюса, и космическое излучение собирается из направлений, близких к вертикальному направлению. И чем больше детектор удаляется от магнитного полюса, тем больше сказывается отклоняющее влияние магнитного поля Земли. При движении магнитного полюса в сторону азиатского континента, станция Thule теряет свои позиции лучшего детектора в северном полушарии для исследования северо-южной анизотропии (рис.2), и значительная часть наблюдательного времени на платформе «Северный полюс» окажется очень благоприятной для таких наблюдений.

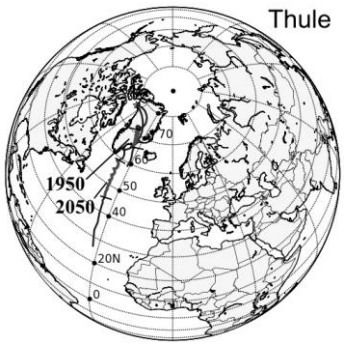


Рисунок 2. Асимптотические направления прихода частиц для двух эпох.

Но и случай, когда детекторы космического излучения находятся в пределах высоких широт, также чрезвычайно важен для исследования анизотропии космических лучей и, в частности, солнечных космических лучей. Высокоширотные детекторы обладают замечательным свойством, а именно эти детекторы собирают солнечные космические лучи (1-5 GV) из экваториальной области, что показано на рис.3, выделенным (риски) диапазоном жесткостей 1-5 GV. На рисунке проводится сравнение асимптотических направлений для 6 точек на широте 85ºN (расстояние до географического полюса ~500 км) для двух эпох 1950 и 2050 через каждые 60º по долготе. На каждой асимптотической кривой выделен диапазон жесткостей 1-5 GV, характерных для солнечных космических лучей.

Цепочка точек 1950 … 2050 – ожидаемая траектория движения полюса.

Движение магнитного полюса в направлении азиатского материка приводит к тому, что американские и канадские станции космических лучей становятся “менее”, а российские “более” полярными станциями.

Варианты конструкции детектора станции “Северный полюс” и оценка их эффективности

Предельный вес детектора для установки на верхней палубе судна - одна секция нейтронного супермонитора. Это позволяет получить статистическую точность ~0.3% при часовом временном разрешении. Поэтому возникает вопрос – есть ли возможность улучшить статистику детектора за счет его переформатирования и применения более чувствительных нейтронных счетчиков? Простые арифметические оценки дают положительный ответ на поставленный вопрос.

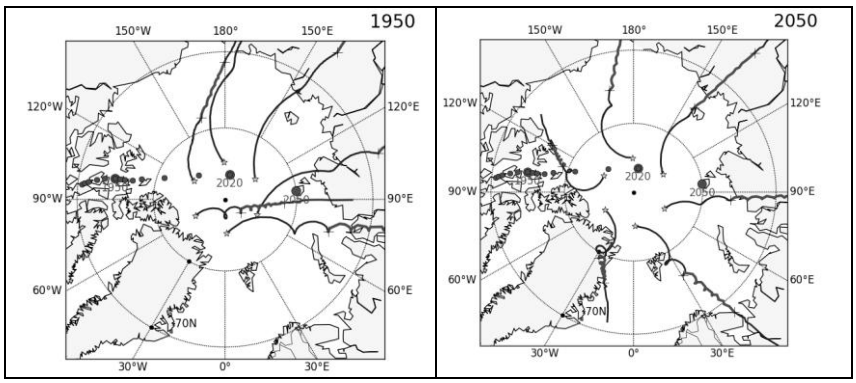


Рисунок 3. Сравнение асимптотических направлений для 6 точек на широте 85ºN через каждые 60º по долготе для двух эпох 1950 и 2050. Выделен диапазон жесткостей 1-5 GV.

Определим какими являются пределы возможностей, т.е. какая доля падающих частиц регистрируется стандартным нейтронным монитором?

Если поток измерять как среднее число частиц в секунду Hz на единицу площади, то на уровне моря на широте с жесткостью геомагнитного обрезания 11 GV поток нейтронов с энергиями >20 MeV равен 19.5±2 Hz/m^2 [1, 2]. С учетом того, что широтный ход для точки с жесткостью геомагнитного обрезания 11 GV равен 0.36, на полюсе поток нейтронов будет равен 31 Hz/m^2. Нас в первую очередь интересует поток нейтронов с пороговыми энергиями >20 MeV, поскольку это порог который задает отражатель стандартного нейтронного монитора. Скорость счета одного счетчика (т.е. 1 m^2) нейтронного монитора nm64 на высоких широтах равна 11 Hz/m^2, а с учетом кратных нейтронов (~1.38) скорость счета равна 8 Hz/m^2. Таким образом, из 31 падающих на детектор нейтронов мы регистрируем только 8, т.е. эффективность нейтронного монитора всего 25%. Поэтому ее можно увеличить до 4 раз.

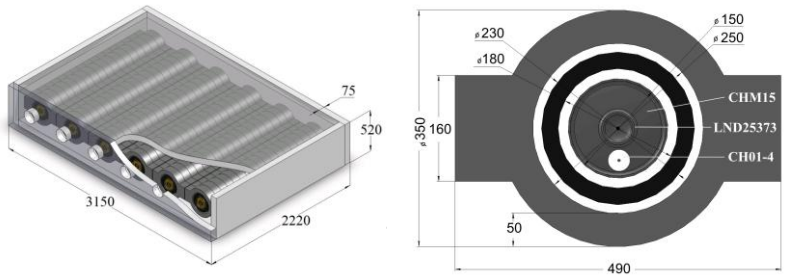


Рисунок 4. Нейтронный супермонитор 6nm64 (Carmichael). Счетчики CHM15 (Ø150), LND25373 (Ø50) или CH01-4 (Ø30 mm).

Стандартная секция нейтронного монитора (рис.4) предполагает использовать борные счетчики большого диаметра CHM15, которые промышленностью в настоящее время не выпускаются. Переход на гелиевые счетчики диаметра Ø30 mm или Ø50 mm диктует необходимость переформатирования конструкции нейтронного монитора, поскольку в стандартном свинцовом кольце размножителе гелиевый счетчик занимают только 4 % объема (правая панель рис.4, счетчик CH01).

Переформатирование конструкции нейтронного монитора можно провести, как показано на рис.5, с применением в качестве свинцового размножителя стандартных свинцовых прямоугольных кирпичей.
На рис. 5. показан модуль 5nm2020 площадью 1m^2 (левая верхняя панель). Модуль содержит 5 счетчиков длиной 1 м и диаметром 30 mm или 50 mm (табл.1). Можно использовать счетчики CH01-4 или LND253124. Лицевой вид модуля показан на правой панели для двух вариантов конструкции с одинарной или двойной толщиной свинца между счетчиками. Это увеличивает вес свинца одной секции с 8970 кг до 10350 кг. Общее размещение секции нейтронного супермонитора 30nm2020 в 20-ти футовом контейнере показано на нижней панели рис. 5.

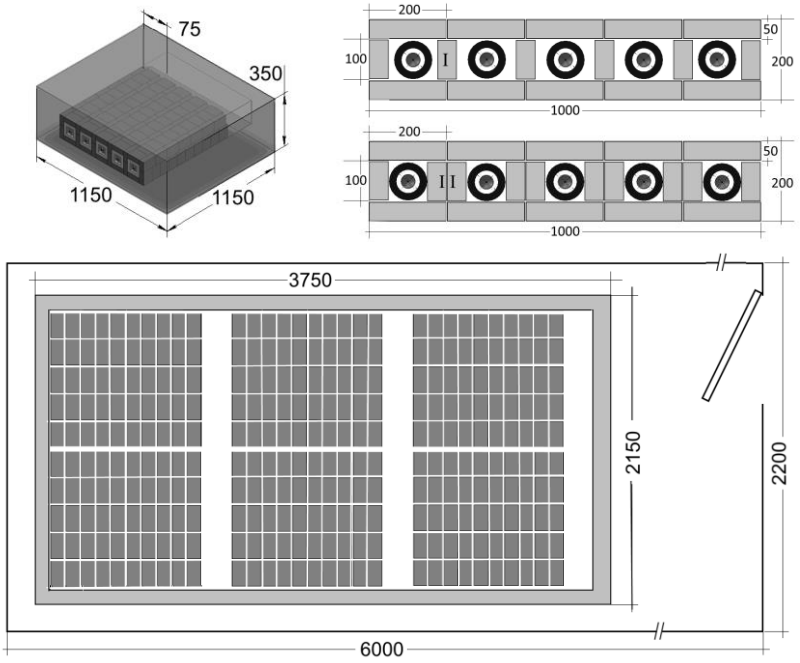


Рисунок 5. Модуль площадью 1m^2 (левая верхняя панель), лицевой вид модулей I и II (правая панель) и расположение модулей нейтронного супермонитора 30nm2020 в 20-ти футовом морском контейнере.

Оценим чувствительность и скорость счета такого детектора. Счетчик характеризуется чувствительностью к тепловым нейтронам *S*, которая для частного случая параллельного потока нейтронов, связана с эффективностью счетчика ε к тепловым (скорость *v*) нейтронам соотношением $S=\varepsilon \cdot d \cdot L$. Здесь *d* и *L* - диаметр и длина счетчика, т.е. $d \times L$ - это площадь детектора, установленного перпендикулярно к направлению потока нейтронов. В случае же изотропного потока для максвелловского спектра тепловых нейтронов (с температурой 293ºK) чувствительность равна

$$S = \pi / 4 \cdot \varepsilon dL \text{ [Hz/nv]},$$

т.е. это скорость счета счетчика, помещенного в поток нейтронов (с плотностью nv) 1 нейтрон на см^2 в секунду.

Таблица 1. Основные характеристики детекторов тепловых нейтронов.

	LND2061 (BP28)	**LND253124**	**CHM15**	**CH01-2**	**CH01-4**
длина, mm	**2088**	**997.8/914.3**	**1900**	**970.0**	**970.0**
диаметр, mm	**Ø152**	**Ø50.8/49.8**	**Ø150**	**Ø30.0**	**Ø30.0**
состав газа	**$^{10}BF_3$, 96%+ $^{11}BF_3$, 4%**	**^{3}He, 97%+ CO_2 3%**	**$^{10}BF_3$, 80%+ $^{11}BF_3$, 20%**	**$^3He + Ar_2$ (2+2 atm)**	**$^3He + Ar_2$ (4+1 atm)**
эффективное сечение, barn	**3770**	**5327**	**3109**	**5327**	**5327**
давление, atm	**0.26**	**3**	**0.26**	**2**	**4**
эффективность	**0.33**	**0.83**	**0.28**	**0.58**	**0.82**
чувствительность, Hz/nv	**789**	**346**	**655**	**135**	**193**
чувствительность секции, Hz/nv	**4734**	**10380**	**3930**	**4050**	**5790**
Ожидаемая скорость счета секции, Hz	**11**	**24.1**	**9.1**	**9.5**	**13.4**

Здесь важно заметить, что чувствительность $S = \pi / 4 \cdot n_0 P \sigma d^2 L$ в итоге пропорциональна квадрату диаметра счетчика, что делает предпочтительным применение счетчиков диаметром 50 мм (см. табл.1).
В предпоследней строке таблицы 1 приведена суммарная чувствительность секций (6м^2), использующих различные типы нейтронных счетчиков. Применение счетчика CH01-4 в мониторе новой конфигурации дает увеличение чувствительности в 1.5 раза относительно стандартной секции нейтронного монитора на основе счетчика CHM15, а переход на счетчики LND253124 диаметром 50 mm увеличивает чувствительность в 2.6 раза и достигает 10380 Hz/nv. Эффективность счетчика, т.е. вероятность зарегистрировать нейтрон в

детекторе диаметром d [см] и содержащем поглотитель с сечением для поглощения нейтронов $\sigma(E)$ [barn] определяется как

$$\varepsilon = 1 - \exp(-n_0 P \sigma d) \cong n_0 P \sigma d ,$$

где n_0 [cm^{-3}] число Лошмидта (плотность частиц), P[atm] – давление газа.

Подведя итоги, можно сказать, что для создании секции (6 m^2) нейтронного супермонитора на основе метровых счетчиков СН01-4 диаметром 30 mm необходимо переформатировать нейтронный супермонитор. Чтобы обеспечить сравнимую со стандартной секцией скорость счета, нужно использовать 30 счетчиков СН01-4. Это диктуется чувствительностью счетчиков СН01-4. Необходимо также принципиально изменить конструкцию нейтронного монитора. Отход от свинцового размножителя в виде специальных колец к свинцовым прямоугольным параллелепипедам (например, 200×100×50 mm^3), позволяет 1) конструктивно упростить нейтронный монитор, 2) уменьшить вес детектора, 3) увеличить эффективность детектора путем увеличения собираемости нейтронов до 2.5 раз в зависимости от используемых нейтронных счетчиков. Для окончательных выводов необходимо провести GEANT моделирование детектора, аналогично работам по моделированию стандартного нейтронного монитора [3-8].

Заключение

1) Со второй половины XX века Северный магнитный полюс довольно быстро движется в сторону Таймыра и к 2050 году полюс может оказаться в районе архипелага Северная Земля. Вследствие движения северного магнитного полюса к азиатскому материку, станция Thule теряет свои позиции лучшего детектора для исследований северо-южной анизотропии, а большая часть наблюдательного времени на платформе «Северный полюс» может оказаться очень благоприятной для таких наблюдений.
2) В процессе движения плавучей платформы «Северный полюс» при регистрации конкретного события мы можем оказаться в наилучшей точке, можем оказаться в не совсем удачной точке, но в любом случае это будет уникальный регион для проведения космофизических исследований.
3) Оценки показывают, что с применением самых чувствительных нейтронных счетчиков в результате переформатирования нейтронного супермонитора можно увеличить эффективность нейтронного монитора до двух с половиной раз. Для детальной количественной оценки необходимо провести моделирование процессов в детекторе.

Благодарности

Работа частично подержана Программой фундаментальных исследований президиума РАН № 3 "Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии" и гранта РНФ 19-72-20085. Исследования проводятся в рамках УНУ "Российская национальная сеть станций космических лучей" (Сеть СКЛ).

Литература

1. Nakamura Takashi, Baba Mamoru, Ibe Eishi, Yahagi Yasuo, Kameyama Hideaki "Terrestrial Neutron-induced Soft Errors in Advanced Memory Devices" World Scientific, 2008 P343. doi.org/10.1142/6661.
2. Gordon M. S., Goldhagen P., Rodbell K.P., Zabel T.H., Tang H.H.K., Clem J.M., Bailey P., "Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground", IEEE Transactions on Nuclear Science, doi:10.1109/TNS.2005.860694, vol. 51, no. 6, pp. 3427-3434, Dec. 2004.
3. Nobles R.A., Huges E.B., Wolfson C.J. Empirical Response Functions for a neutron Multiplicity Monitor. Journal of Geophys. Res., 74:6459–6470, 1969
4. Clem J.M., Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, 1999, vol. 7, p. 317.Google Scholar
5. Clem J.M., Dorman L.I. “Neutron Monitor Response Functions” Space Science Reviews. 2000. V.93. no. 1–2. pp 335–359. doi: 10.1023/A:1026508915269.
6. Pletnikov E.V, Kartyshov V.G., Yanke, V.G., “Multiplicity and Coupling function of the neutron and muon components”, ICRC 30th, Mexico, 2007. id225
7. Maurchev E.A., Balabin Yu.V., “A new neutron spectrometer with narrow acceptance diagram”, Proceedings of the 32nd ICRC, P. 173-175., 2011.
8. Абунин А.А., Плетников Е.В., Щепетов А.Л., Янке В.Г., “Эффективность регистрации нейтронных детекторов различной геометрии”, Изв. РАН., серия физ., 2011, том 75, № 6, с. 917–919. <Traslation> Abunin,A.A.; Pletnikov,E.V.; Shchepetov,A.L.; Yanke,V.G. “Efficiency of detection for neutron detectors with different geometries” Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, vol. 75, issue 6, pp. 866-868, 2011. https://doi.org/10.3103/S1062873811060037

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 114-117
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.114-117

СВЯЗЬ ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ РАЗНЫХ ТИПОВ С ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Т.А. Яхнина, Н.В.Семенова, А.Г. Яхнин

ФБГНУ Полярный геофизический институт, Апатиты

Аннотация. Связь высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ) разных типов, наблюдавшихся на низкоорбитальных спутниках NOAA POES, с геомагнитной активностью рассмотрена для трех 184-дневных интервалов, характеризующихся разными уровнями геомагнитной возмущенности. Показано, что вероятность наблюдения и средний поток высыпающихся релятивистских электронов растет с ростом уровня геомагнитной возмущенности для всех рассмотренных типов высыпаний. Для разных уровней геомагнитной активности построены карты вероятности наблюдения ВРЭ в координатах *L-MLT*.

Abstract. Relationship between relativistic electron precipitation (REP) of different types, which are observed with NOAA polar orbiting environmental satellites (POES), and geomagnetic activity is considered on the basis of data obtained during three 184-day intervals which are characterized by geomagnetic disturbances of different intensity. It is shown that both the probability of REP observations and the mean REP intensity increase when the level of geomagnetic activity increases. This holds true for every REP type. The maps of the REP occurrence rate in the *L-MLT* coordinates are constructed for different levels of the geomagnetic activity.

Введение

Зависимость высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ) от геомагнитной активности изучена довольно слабо. Большинство исследований взаимосвязи потоков релятивистских электронов с активностью (см., например, [1] и ссылки в этой работе) относятся к захваченной компоненте, поскольку они основывались на данных магнитосферных спутников (например, геостационарных), приборы которых не могли измерять потоки частиц в конусе потерь. Исследования взаимосвязи ВРЭ с активностью по данным низкоорбитальных спутников касались, в основном, вариаций потоков релятивистских электронов во время геомагнитных бурь [2-4].

В работах [5, 6] проведено разделение событий ВРЭ на три группы, которые соответствуют разным механизмам рассеяния релятивистских электронов в конус потерь. Это разделение основано на сопоставлении ВРЭ, зарегистрированных на спутниках NOAA POES, с высыпаниями энергичных (>30 кэВ) электронов и протонов. События ВРЭ *первой группы* наблюдаются на внешней границе радиационного пояса, в окрестности изотропной границы [7] и, вероятно, связаны с изотропизацией потока в экваториальной плоскости магнитосферы в области малого радиуса кривизны магнитного поля. События *второй группы* связаны с одновременными высыпаниями субрелятивистских электронов. Эти высыпания могут быть обусловлены взаимодействием с волнами вистлеровского типа (плазмосферный хисс), либо с электростатическими верхнегибридными волнами [8, 9]. Наконец, события ВРЭ *третьей группы* связаны с одновременными высыпаниями энергичных протонов внутри зоны захвата протонов. Поскольку такие протонные высыпания связывают с ЭМИЦ волнами [10], считается, что ВРЭ третьей группы – это результат рассеяния релятивистских электронов в конус потерь при развитии ионно-циклотронной неустойчивости (см., например, работу [7] и ссылки в ней).

В данной работе мы проведем рассмотрение зависимости вероятности наблюдения и интенсивности потока ВРЭ для этих трех групп от геомагнитной активности.

Данные

События ВРЭ определялись по данным прибора MEPED на спутниках серии POES (NOAA-15, -16, -17, -18) (см., описание характеристик прибора в работе [5]). Использовались данные, полученные в течение трех полугодовых интервалов с июля по декабрь в 2005, 2009, 2011 гг. Эти три интервала характеризуются разной средней геомагнитной активностью: слабой (2009 г.), умеренной (2011 г.) и относительно высокой (2005 г.). На рис. 1, который показывает вариации параметров, характеризующих солнечную активность, состояние солнечного ветра, и геомагнитную активность, эти интервалы выделены серыми вертикальными полосами. Значения индексов геомагнитной активности (Kp, Dst, AE) с различным временным разрешением взяты из базы данных OMNI (https://omniweb.gsfc.nasa.gov).

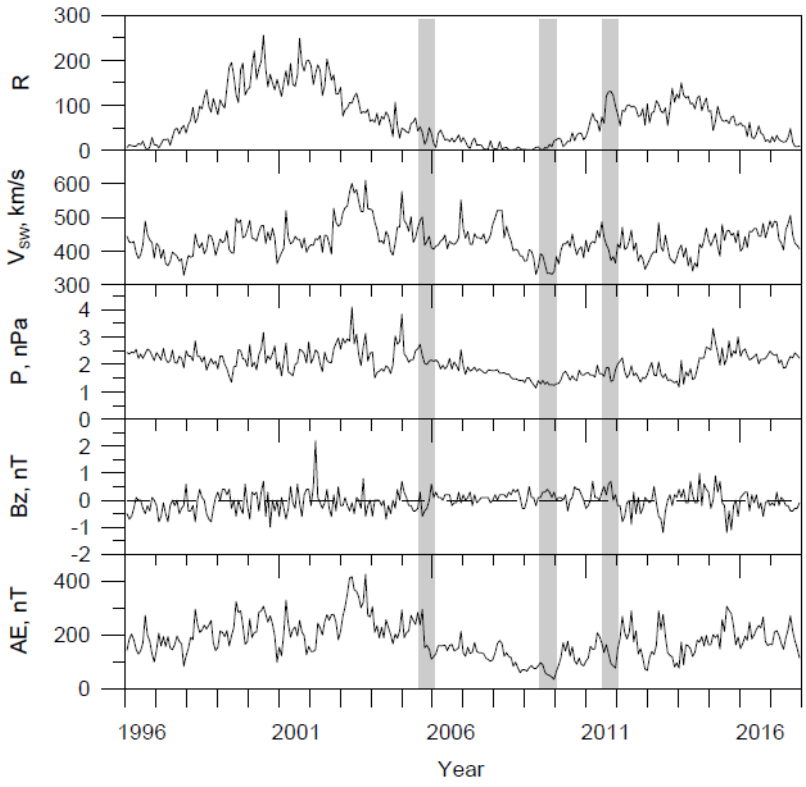


Рисунок 1. Вариации чисел Вольфа, скорости и динамического давления солнечного ветра, вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля и AE-индекса в течение 23-го и 24-го циклов солнечной активности.

Результаты

В таблице 1 приведены сведения о количестве событий ВРЭ в каждом интервале и в каждой группе, средние потоки релятивистских электронов (в единицах скорости счета прибора) и информация о среднем уровне геомагнитной активности в каждом интервале и во время событий ВРЭ. Максимальное количество событий ВРЭ было зафиксировано в наиболее активный период в 2005 г. (1057 событий), минимальное – в интервале минимальной возмущенности в 2009 г (69 событий).

Из таблицы видно, что процентное содержание ВРЭ разных групп не остается постоянным при различной активности. Доля ВРЭ первой группы меняется от 26% в интервале с высокой активностью (2005 г.) до 7% в спокойных условиях (2009 г.). Доля событий второй группы варьируется от 59% до 74%, а доля событий третьей группы от 13% до 19%.

Обращает на себя внимание тот факт, что события ВРЭ (как в целом, так и в каждой группе) наблюдаются при большей активности, по сравнению со средней активностью в соответствующем интервале. Так, Кр-индекс во время событий ВРЭ в 2005 г. в среднем был равен 32.4 (по группам, соответственно, 36, 31.4, 30.4), а средний Кр-индекс в июле-декабре 2005 г. равнялся 20.5. В 2011 г. среднее значение Кр-индекса составляло 14.2, а ВРЭ наблюдались при средней активности 30.9. В 2009 г. среднее значение Кр составило 7.8, а во время ВРЭ – 16.7. То же самое можно сказать про индексы Dst и AE. Исключение составляет лишь значение индекса Dst для событий третьей группы в 2005 г., когда средние значения этого индекса во всем интервале и во время ВРЭ были почти одинаковыми.

Средняя скорость счета релятивистских электронов в 2005 г. составила 30.9 (по группам 25.5, 24.9, 63.8, соответственно), в 2011 г. – 16.8 (17.7, 13.9, 29.6), а в 2009 – 10 (5.5, 9.8, 12.1). Таким образом, как в целом, так и в каждой группе, средняя интенсивность потока высыпающихся релятивистских электронов показывает явную зависимость от средних значений индексов геомагнитной активности в рассматриваемых интервалах.

На рис. 2 показано глобальное распределение вероятности наблюдения ВРЭ различных групп в 2005 г. в зависимости от геомагнитной активности: слабой (AE<100 нТл, верхняя панель), умеренной (100<AE<300 нТл, средняя панель) и высокой (AE>300 нТл, нижняя панель). Вероятность наблюдения определялась как отношение числа пролетов спутников, на которых наблюдались ВРЭ, к общему числу пролетов этих спутников через ячейку с размерами 1 R_E по L и 1 час по MLT.

Таблица 1

Номер группы ВРЭ /год	Число событий ВРЭ	Процентное содержание событий данной группы	Средний поток (скорость счета)	Кр*10	Dst	AE	Кр*10	Dst	AE
				Среднее значение в моменты ВРЭ			Среднее значение за июль- декабрь		
1/2005	276	26.1	25.5	36	-36.4	435	20.5	-16	213
2/2005	621	58.8	24.9	31.4	-27.6	407			
3/2005	160	15.1	63.8	30.2	-15.4	387			
Все/2005	1057	100	30.9	32.4	-28	411			
1/2011	76	21.7	17.7	34.2	-26.2	452	14.2	-12.7	129
2/2011	228	65.1	13.9	29.3	-21.7	357			
3/2011	46	13.2	29.6	33.5	-19.9	467			
Все/2011	350	100	16.8	30.9	-22.2	392			
1/2009	5	7.3	5.5	18.6	-4.2	203	7.8	-2.5	63
2/2009	51	73.9	9.8	15	-5.1	151			
3/2009	13	18.8	12.1	22.4	-8.3	229			
Все/2009	69	100	10	16.7	-5.6	170			

События первой группы наблюдаются главным образом в полуночном секторе. При низкой активности (AE<100 нТл) область этих высыпаний располагается в узком секторе MLT на L=6-7. Максимальное значение вероятности наблюдения таких событий составляет менее 2%. С ростом геомагнитной активности область ВРЭ первой группы расширяется по MLT, оставаясь в ночном секторе, и в сторону меньших L-оболочек. Вероятность наблюдения в максимуме достигает 6% при AE>300 нТл.

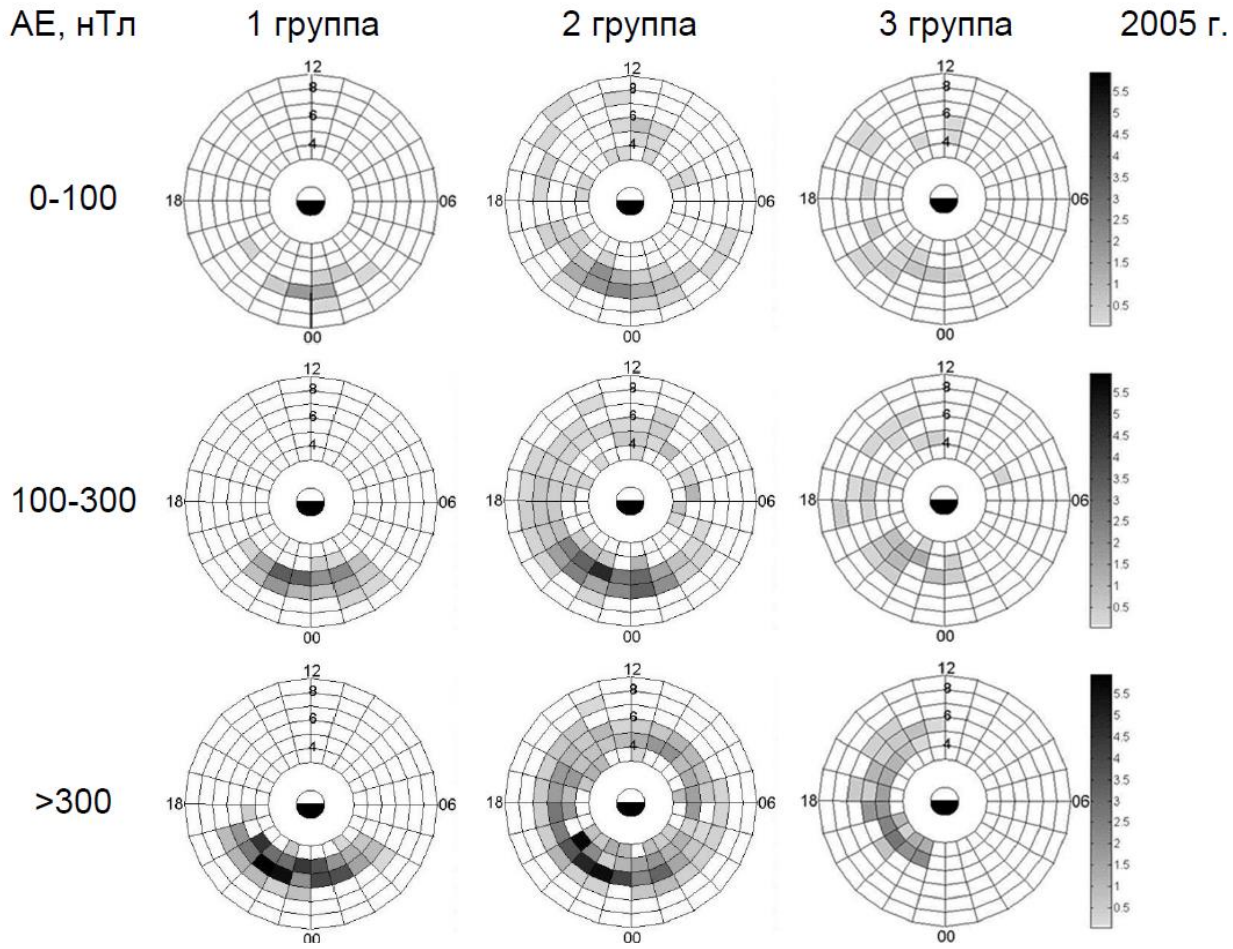


Рисунок 3. Вероятность наблюдения высыпаний релятивистских электронов в координатах *L-MLT* для разных групп высыпаний и разных уровней геомагнитной активности.

События второй группы, хотя и имеют максимальную вероятность наблюдения в предполуночные часы, могут наблюдаться во всех секторах MLT. Максимальная вероятность наблюдения ВРЭ этой группы также растет с ростом активности от 2.5% при AE<100 нТл до 6-7% при AE>300 нТл. События третьей группы наблюдаются в вечернем секторе. Максимальная вероятность наблюдения растет с 1 до 3% при росте геомагнитной активности. Подобные карты для 2011 и 2009 гг. (здесь не приводятся) показывают похожие распределения, но значения вероятности наблюдения ВРЭ в эти годы, соответственно, ниже.

Обсуждение

Известно, что потоки захваченных в магнитосфере релятивистских электронов плохо коррелируют с *текущей* геомагнитной активностью [1]. Это, очевидно, связано с тем, что за появление релятивистских частиц ответственны процессы ускорения, происходящие в течение достаточно длительного времени (до нескольких суток). Поскольку высыпание представляет собой результат рассеяния захваченных частиц в конус потерь, ожидать хорошей корреляции интенсивности отдельных событий ВРЭ с *текущей* активностью также не приходится. Зависимость *средней* интенсивности ВРЭ от *средней* геомагнитной активности (Таблица 1), объясняется, по-видимому, тем, что усреднение за длительный интервал времени «учитывает» предысторию геомагнитной активности для событий ВРЭ в этом интервале.

Из рис.2 следует, что морфология ВРЭ разных групп, описанная в [5, 6], при росте активности остается неизменной, но растет вероятность наблюдения высыпаний и размеры области, в которой высыпания могут наблюдаться. Для событий ВРЭ первой группы это, очевидно, объясняется динамикой изотропной границы. При росте активности область контакта изотропной границы с внешним радиационным поясом приближается к Земле и расширяется в долготном направлении. События ВРЭ второй и третьей групп связанны с рассеянием на волнах. Известно, что интенсивность и размеры областей генерации волн в магнитосфере увеличиваются с ростом геомагнитной активности (например, [11]). Это объясняет рост вероятности наблюдения ВРЭ второй и третьей групп и расширение областей наблюдения этих ВРЭ с ростом геомагнитной активности (Таблица 1 и рис. 2).

Благодарности

Работа Н.В. Семеновой и А.Г. Яхнина поддержана грантом РНФ 15-12-20005.

Литература

1. Lyatsky, W., and G. V. Khazanov (2008), Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit, J. Geophys. Res., 113, A08224, doi:10.1029/2008JA013048.
2. Nakamura, R., M. Isowa, Y. Kamide, D. N. Baker, J. B. Blake, and M. Looper (2000), SAMPEX observations of precipitation bursts in the outer radiation belt, J. Geophys. Res., 105(A7), 15,875–15,885, doi:10.1029/2000JA900018.
3. Horne, R. B., M. M. Lam, and J. C. Green (2009), Energetic electron precipitation from the outer radiation belt during geomagnetic storms, Geophys. Res. Lett., 36, L19104, doi:10.1029/2009GL040236.
4. Meredith, N. P., R. B. Horne, M. M. Lam, M. H. Denton, J. E. Borovsky, and J. C. Green (2011), Energetic electron precipitation during high- speed solar wind stream driven storms, J. Geophys. Res., 116, A05223, doi:10.1029/2010JA016293.
5. Yahnin, A. G., T. A. Yahnina, N. V. Semenova, B. B. Gvozdevsky, and A. B. Pashin (2016), Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 8286–8299, doi:10.1002/2016JA022765.
6. Yahnin, A. G., T. A. Yahnina, T. Raita, and J. Manninen (2017), Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 9169–9182, doi:10.1002/2017JA024249.
7. Sergeev, V. A., and N. A. Tsyganenko (1982), Energetic particle losses and trapping boundaries as deduced from calculations with a realistic magnetic field model, Planet. Space Sci., 30, 999–1006, doi:10.1016/0032-0633(82)90149-0.
8. Thorne, R. M. (2010), Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions, Geophys. Res. Lett., 37, L22107, doi:10.1029/2010GL044990.
9. Shklyar, D. R., and B. Kliem (2006), Relativistic electron scattering by electrostatic upper hybrid waves in the radiation belt, J. Geophys. Res., 111, A06204, doi:10.1029/2005JA011345.
10. Yahnin, A. G., and T. A. Yahnina (2007), Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 69(14), 1690–1706, doi:10.1016/j.jastp.2007.02.010.
11. Meredith, N. P., R. B. Horne, R. M. Thorne, D. Summers, and R. R. Anderson (2004), Substorm dependence of plasmaspheric hiss, J. Geophys. Res., 109, A06209, doi:10.1029/2004JA010387.

«Гелиогеофизические исследования в Арктике». Труды второй всероссийской конференции, Мурманск, 24-26 сентября 2018, с. 118-121
© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 2018

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.118-121

ОБРАЗОВАНИЕ И ГАШЕНИЕ СОСТОЯНИЙ ГЕРЦБЕРГА МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА НА ВЫСОТАХ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА ЗЕМЛИ

Антоненко О.В., Кириллов А.С., Куликов Ю.Н.
Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты, Россия

Аннотация. Обсуждаются процессы релаксации электронно-возбужденных состояний молекулярного кислорода в атмосфере нашей планеты на высотах свечения ночного неба, где из-за диссоциации O_2 солнечным УФ-излучением наблюдаются относительно высокие концентрации атомарного кислорода. Показано, что рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга имеют различную зависимость от колебательного номера для рассмотренных случаев.

Abstract The relaxation processes of electronically excited states of molecular oxygen at the altitudes of the nightglow in the Earth's atmosphere are discussed. Due to the dissociation of O_2 by solar UV radiation, high concentrations of atomic oxygen are observed. It is shown that the calculated vibrational populations of the $c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ states have a different dependence on the vibrational number for considered cases.

Введение

Молекулярный кислород O_2 – это второй по содержанию (после молекулярного азота N_2) из основных газов в атмосфере Земли.

В верхней атмосфере Земли эффективно протекает процесс диссоциации молекул O_2 солнечным УФ излучением (фотоны УФ < 240 нм)

$$O_2 + h\nu \rightarrow O + O, \quad (1)$$

что приводит к образованию относительно высоких концентраций атомарного кислорода O на высотах более 80 км, с максимумом около 95-100 км на Земле.

Кроме того, при тройных столкновениях в атмосфере нашей планеты

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M, \quad (2)$$

с участием атома и молекулы кислорода (где M – обозначает молекулы азота или кислорода) образуется озон O_3. Кроме того, необходимо учесть тот факт, что давление на указанном интервале высот порядка 10^{-2}-10^0 Па и столкновительные времена жизни сравнимы с излучательными[6].

Поэтому при моделировании интенсивностей свечения различных полос необходимо включить вклад межмолекулярных и внутримолекулярных процессов переноса электронного возбуждения с участием O_2^* при столкновениях с невозбужденными молекулами N_2 и O_2 [6].

На рисунке 1 представлены высотные распределения атомарного кислорода O для различных месяцев года для условий низкой(F=75, 1976 и 1986 гг) и высокой (F=203, 1980 и 1981 гг) солнечной активности. Следует отметить, что в соответствии с основными закономерностями вариаций интенсивности эмиссий 557.7 нм слой атомарного кислорода так же значительно изменяет положение своего максимума [1] Это уже отмечалось ранее [2].Увеличение солнечной активности приводит к росту концентрации O в максимуме слоя и опускание его нижней границы, на что так же указывалось [3].

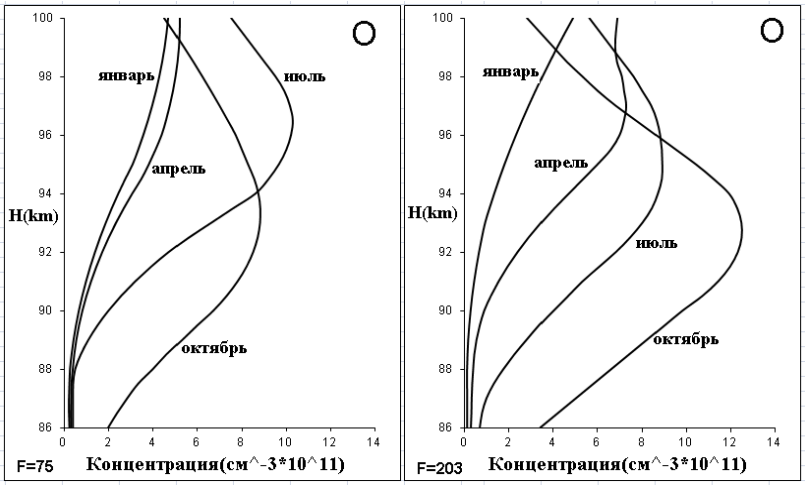


Рис.1 Высотные распределения атомарного кислорода O для различных месяцев года.

Индикатором наличия кислорода в атмосфере планет являются свечение различных полос у молекулы O_2. На рис.2 приведена схема трёх электронно-возбужденных состояний Герцберга ($c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$), двух синглетных состояний ($a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$), и основного $X^3\Sigma_g^-$ состояния молекулы O_2, а также указаны названия систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями, каждое из которых находятся ниже диссоционного предела молекулы O_2 (~41300 см$^{-1}$, 8065 см$^{-1}$ = 1эВ).

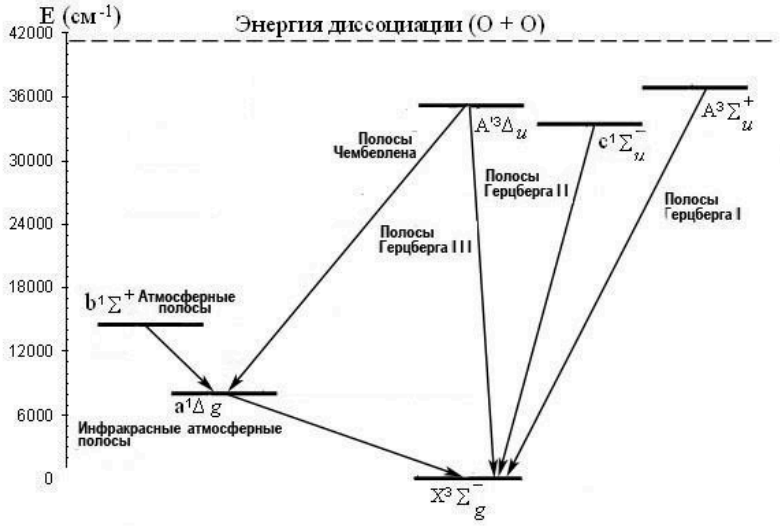


Рис.2. Электронные переходы внутри молекулы O_2.

Цель данной работы – представить результаты экспериментальных и теоретических исследований свечения молекулярного кислорода O_2 в атмосфере Земли, а также рассмотреть особенности кинетики возбуждения электронных уровней энергии кислородных составляющих в атмосфере Земли

Свечение ночного неба Земли

Наиболее четко свечение молекулярного кислорода прослеживается в спектрах свечения ночного неба Земли [4]. Еще в начале 60-х годов прошлого века сотрудниками ИФА РАН Красовским В.И. и Шефовым Н.Н. были опубликованы спектры, где четко было показано присутствие полос Герцберга I ($A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$,v'=1-13) в диапазоне 300-450 нм. Дальнейшие измерения спектров ночного неба американскими исследователями [5] также указали на интенсивное свечение полос Чемберлена ($A'^3\Delta_u$,v=0$\rightarrow a^1\Delta_g$,v'=4-8) (рис.3). Ещё позднее спектральные измерения интенсивностей полос Герцберга I и Чемберлена в свечении атмосферы Земли, выполненные при помощи сканирующего спектрометра и с помощью телескопа Keck I, показали, что на высотах свечения этих эмиссий в ночном небе Земли максимальная населенность колебательных уровней молекулы O_2 наблюдается для состояний $A^3\Sigma_u^+$, v=6 и $A'^3\Delta_u$, v=6-7 [6,7].

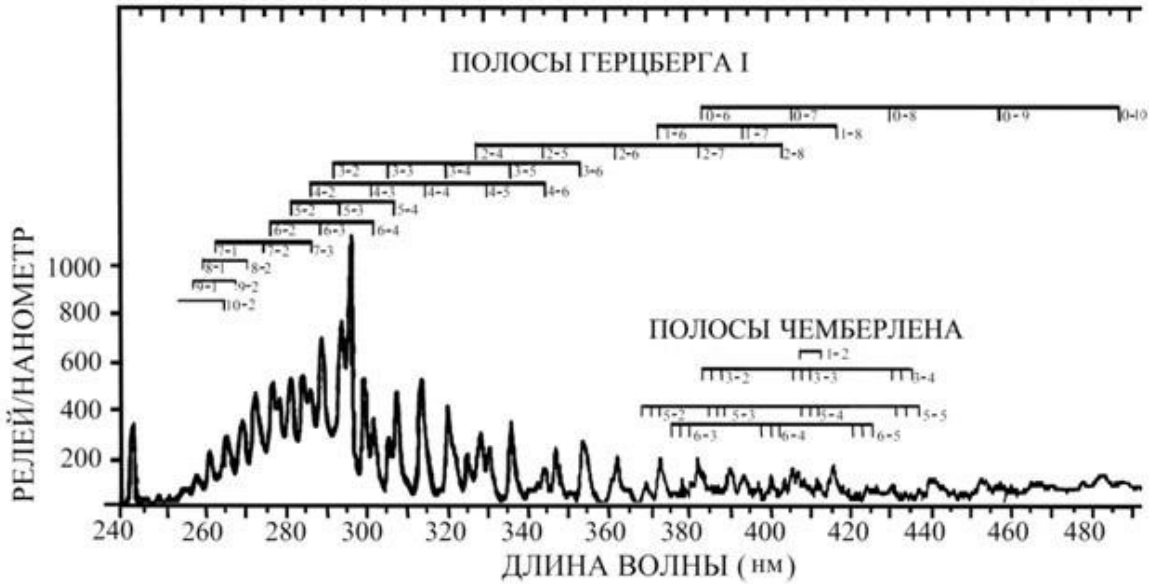


Рис.3. Спектр свечения ночного неба Земли в диапазоне 240-440 нм (2400-4400 Å).

Получены профили концентрациий возбуждённого кислорода O_2* в зависимости от высоты на высотах верхней атмосферы Земли для состояний: $A'^3\Delta u$ (v=6) (a), $A^3\Sigma u+$ (v=6) (b) для различных месяцев года для условий низкой(F=75, 1976 и 1986 гг) и высокой (F=203, 1980 и 1981 гг) солнечной активности.[1] (рис. 4)

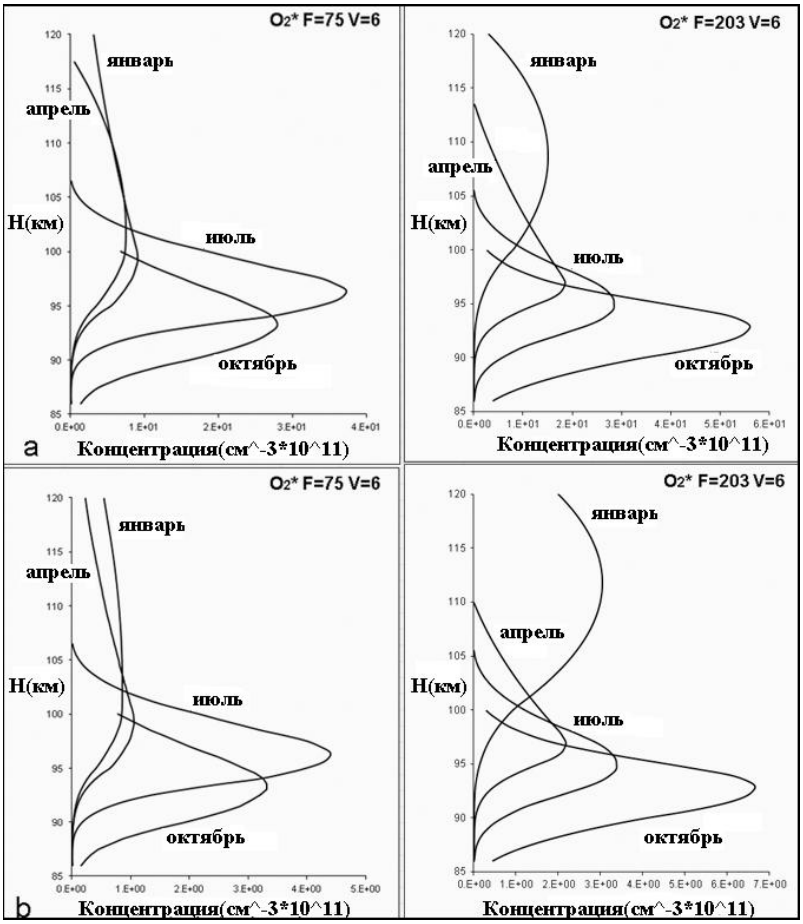


Рис.4. Профили концентрациий возбуждённого кислорода O_2*.

В таблице 1 и в таблице 2 приведены значения интенсивности свечения I(c^-1*cm^-2) для состояния $A^3\Sigma u+$ (v=6) и $A'^3\Delta u$ (v=6,) для различных месяцев года для условий низкой(F=75, 1976 и 1986 гг) и высокой (F=203, 1980 и 1981 гг) солнечной активности.[1]

Таблица 1

F=75							
$A^3\Sigma u^+$				**$A'^3\Delta u$**			
январь	***апрель***	***июль***	***октябрь***	***январь***	***апрель***	***июль***	***октябрь***
4.71E+09	4.16E+09	6.86E+09	5.69E+09	2.40E+09	3.08E+09	4.60E+09	3.78E+09

Таблица 2

F=203							
$A^3\Sigma u^+$				**$A'^3\Delta u$**			
январь	***апрель***	***июль***	***октябрь***	***январь***	***апрель***	***июль***	***октябрь***
1.30E+10	4.32E+09	5.80E+09	9.68E+09	4.99E+09	3.37E+09	3.87E+09	6.42E+09

3. Результаты моделирования колебательной населенностей в атмосферах Земли и Венеры.

На рис.5 приведены рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга молекулы кислорода ($c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$) на высоте 95 км в атмосфере Земли.

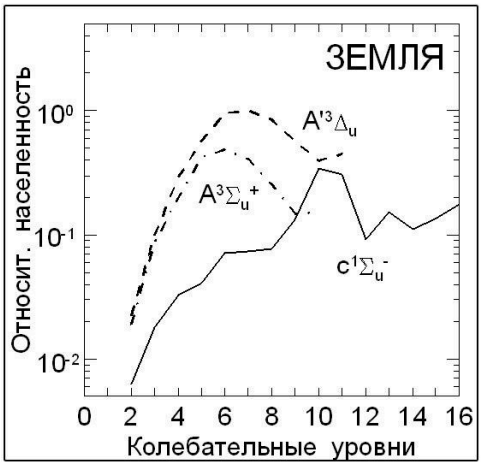


Рис.5. Рассчитанные колебательные населенности состояний $c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^-$ в атмосфере Земли

Таким образом, как показали результаты расчетов (см. рис.5), для случая атмосферы Земли максимум относительной населённости триплетных состояний Герцберга в ночной атмосфере приходится на 6-8 колебательные уровни. Выше указано, что спектральные измерения интенсивностей полос Герцберга и Чемберлена при помощи аппаратов [6,7] так же показали, что максимальная населенность колебательных уровней молекулы O_2 в ночной атмосфере Земли наблюдается для состояний $A^3\Sigma_u^+$, $A'^3\Delta_u$, на 6-7 колебательных уровнях. Поэтому в спектре свечения ночного неба Земли наблюдаются различные полосы, обусловленные излучательными переходами с этих и близлежащих колебательных уровней состояний $A^3\Sigma_u^+$ и $A'^3\Delta_u$ (рис.2).

Заключение

В результате наблюдений спектров полос молекулярного кислорода в свечении ночного неба Земли обнаружено: широкий спектр полос Герцберга I и Чемберлена в её атмосфере, причём в ночной атмосфере нашей планеты переходы осуществляются с ненулевых колебательных уровней состояний $A^3\Sigma u+$, (v=6) и $A'^3\Delta u$, (v=6-7).

Показано, что рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга имеют различную зависимость от колебательного номера для рассмотренных случаев:

- максимум относительной населённости состояний Герцберга в ночной атмосфере Земли приходится на 5-7 (Герцберг 1), 6-8 (Герцберг 3) колебательные уровни.

Получены профили концентрациий и значения интенсивностей свечения возбуждённого кислорода O_2* на высотах верхней атмосферы Земли для состояний: $A'^3\Delta u$. (v=6) , $A^3\Sigma u+$ (v=6).

Литература

1. Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор её структуры и динамики.//М. ГЕОС, 2006, 741 с.

2. Перминов В.И., Семёнов А.И., Шефов Н.Н. Дезактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопаузы. // Геомагнетизм и Аэрономия, 1998, т.38, №6, с.642-645.

3. Семёнов А.И., Шефов Н.Н. Вариации температуры и содержания атомарного кислорода в области мезопаузы и нижней атмосферы при изменении солнечной активности. //Геомагнетизм и Аэрономия, 1999, т.39, №4, с.87-91.

4. Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I. Atlas of the airglow spectrum 3000-12400 Å. // Planetary and Space Science, 1962, v.9, №12, p.883-915.

5. Broadfoot A.L., Bellaire P.J.,Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow. // Journal of Geophysical Research, 1999, v.104, №A8, p.17127-17138.

6. Антоненко О.В., Кириллов А.С., Куликов Ю.Н. Электронно - возбуждённые кислородные составляющие в атмосферах планет земной группы. // Прикладная Фотоника, 2016, Т.3, № 4, СС 370-387

7. Antonenko O.V., Kirillov A.S., Kulikov Y. N. The study of production and quenching mechanisms of electronically exited O_2 in the nightglow of planets of terrestrial group// Physics of Auroral Phenomena, Proc. XLI Annual Seminar, Apatity, 2018, pp 122-125.

ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
183010, г.Мурманск, ул.Халтурина, 15

POLAR GEOPHYSICAL INSTITUTE
15, Khalturina str., Murmansk, 183010, RUSSIA

