Федеральное агенство научных организаций

Российская академия наук

Полярный геофизический институт

При финансовой поддержке



ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АРКТИКЕ

Всероссийская конференция 19-23 сентября 2016, г. Мурманск

Сборник трудов конференции

Апатиты 2016

УДК 551.510.535/.537

ISBN 978-5-91137-348-1

Организационный комитет:

Сафаргалеев Владимир (председатель)

Орлов Константин (зам. председателя)

Сахаров Ярослав

Григорьев Валерий

Миличенко Александр

Кильцов Артем

Программный комитет:

д.ф.-м.н. Козелов Б.В., председатель (ПГИ)

член-корр.АН Петрукович А.А., зам. председателя (ИКИ РАН)

член-корр.АН Потехин А.П. (ИСЗФ СО РАН)

д.ф.-м.н. Терещенко Е.Д. (ПГИ)

д.ф.-м.н. Сафаргалеев В.В. (ПГИ)

д.ф.-м.н. Кузнецов В.Д. (ИЗМИРАН)

д.ф.-м.н. Трошичев О.А. (ААНИИ)

д.ф.-м.н. Стародубцев С.А. (ИКФИА РАН)

д.ф.-м.н. Пилипенко В.А. (ИФЗ РАН)

д.ф.-м.н. Мингалев В.С. (ПГИ)

д.ф.-м.н. Воробьев В.Г. (ПГИ)

д.т.н. Кулешов Ю.В. (ВКА им. Можайского)

к.т.н. Ляхов А.Н. (ИДГ РАН)

Адрес

ул. Халтурина д. 15 Мурманск, 183010

РΦ

Главный редактор:

В.В. Сафаргалеев

Редакторы:

Н.Н. Сафаргалеева

Н.В. Семенова

http://pgia.ru/gelio_in_arctic/

СОДЕРЖАНИЕ

Г. Гивишвили, И. Крашенинников, И. Стаханова	Многочастотное радиопросвечивание арктической ионосферы	11
С. Гончаров, А. Ляхов, Т.В. Лосева	Влияние солнечных вспышек на частоты Шумановского резонанса	15
В. Григорьев, С. Стародубцев, П. Гололобов	Наземный мониторинг космических лучей и прогноз геомагнитных возмущений	19
Н. Данилкин, Г. Жбанков, В. Лапшин, И. Романов, М. Филиппов	Перспективы внешнего радиозондирования арктической ионосферы с высокоэллиптических ИСЗ	23
А. Июдин, В. Богомолов, Г. Гарипов, И. Максимов, А. Маркелова, К. Салеев, С. Свертилов, И. Яшин	Высокоэнергиные излучения электромагнитных разрядов в полярном регионе по данным наземных и космических экспериментов	26
А. Кириллов, Р. Вернер, В. Гинева	Кинетика метастабильного молекулярного азота на высотах верхних атмосфер планет солнечной системы	30
О. Лебедь, С. Пильгаев, А. Ларченко, М. Филатов, А. Никитенко, Ю. Федоренко	Результаты наземных наблюдений и моделирования поля ионосферного ОНЧ источника в экспериментах по нагреву ионосферы мощным КВ сигналом	34
В. Любчич, В. Григорьев, И. Демченко	Исследование литосферы арктических островов электромагнитными методами	38
А. Намгаладзе, М. Князева, М. Карпов, О. Золотов	Физико-математическое моделирование как альтернатива наблюдениям в Арктике	42
М. Панасюк, С. Свертилов, В. Богомолов, Г. Гарипов, А. Богомолов, А. Июдин, М. Казначеева, В. Калегаев, П. Климов, И. Максимов, И. Мягкова, В. Петров, А. Прохоров, К. Салеев, И. Яшин	Высыпания магнитосферных релятивистских электронов и высотные электромагнитные разряды в полярных областях по данным наблюдений на спутниках «Вернов» и «Ломоносов»	46
В. Ролдугин, А. Ролдугин, Н. Клеймёнова	Наблюдения в высоких широтах северного полушария световых вспышек, вызванных молниевыми разрядами в южном полушарии	50

Н. Романова	Сходство параметров мелкомасштабных неоднородностей в F-области высокоширотной и среднеширотной ионосферы	54
Е. Терещенко, А. Сидоренко,В. Григорьев	Влияние солнечного затмения 20 марта 2015 г. на условия распространения СНЧ волн на высокоширотной трассе	58
Е. Терещенко, Р. Юрик	Изменение формы спектра искусственного радиоизлучения ионосферы в зависимости от длительности нагревных импульсов	62
В. Удриш, В. Смирнов, А. Тертышников, Я. Глухов, Д. Ковалев, П. Тимофеев, Г. Коваленко, А. Окатьев	Зондирование аврорального овала с НИС «Профессор Молчанов» и «Академик Федоров» по сигналам КА ГЛОНАСС/GPS	66
С. Черноус, И. Шагимуратов, М. Филатов, М. Швец, И. Ефишов, Ю. Федоренко, И. Иевенко, Н. Калитенков	Овал полярных сияний как диагностическое средство пространственно временного распределения неоднородностей ПЭС в Арктике	70
С. Черняков, В. Терещенко, О. Оглоблина, Е. Васильев, А. Гомонов	Ионосферные эффекты в D-области ионосферы высоких широт во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г.	74
Н. Ягова, О. Козырева, А. Козловский	Спектральные параметры геомагнитных пульсаций и колебаний критической частоты $foF2$ в диапазоне 1-5 мГц (Pc5/Pi3) по результатам измерений в обс. Соданкюля	78
Н. Ягова, А. Лхамдондог, Ю. Гусев, В. Пилипенко, Е. Федоров	Частоты появления экстремальных значений производных по времени геомагнитного поля, потенциально опасных для промышленных электрических сетей, по данным многолетних наблюдений на сети IMAGE	84
Ю. Балабин, Б. Гвоздевский, А. Германенко, Л. Щур	Нейтронный монитор в Баренцбурге	87
В. Григорьев, А. Яковлев, А. Михайлюк, Т. Григорьева	Экспериментальная установка для изучения изменений параметров поведения серого тюленя при воздействии на него электромагнитных полей экстремально низких частот в диапазоне 0,01-36 Гц	91
Б. Козелов	Система авроральных камер MAIN	95

М. Кузнецова, С. Пильгаев, А. Ролдугин	Оптические приборы для авроральных наблюдений	99
В. Милкин, П. Быченков	Антенные инновации для круговой поляризации	103
В. Милкин, Е. Шубина, М. Татусяк	Управление диаграммами направленности антенн в беспроводных сетях на базе Wi-Fi адаптеров	106
В. Милкин, В. Полежаев	Реализация круговой поляризации в горизонтальной плоскости на базе изотропных антенн с повышенным коэффициентом усиления	110
В. Милкин, П. Быченков	Комбинированные декаметровые антенны для ближней радиосвязи	114
С. Николашкин	Оптический комплекс ИКФИА СО РАН	118
С. Пильгаев, М. Филатов, А. Ларченко, А. Ролдугин, А. Никитенко, С. Черноус, О. Лебедь, Ю. Федоренко	Наземные наблюдения волновых процессов в Арктике	122
С. Стародубцев, В. Григорьев, П. Гололобов	Якутский спектрограф космических лучей им. А.И. Кузьмина: современное состояние	125
Е. Терещенко, Р. Юрик,В. Григорьев, Н. Романова	Радиотомографическая установка полярного геофизического института КНЦ РАН	129

...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 доклады по секциям:

- Фундаментальные исследования причинноследственных 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

МНОГОЧАСТОТНОЕ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ АРКТИЧЕСКОЙ ИОНОСФЕРЫ

Г.В. Гивишвили, И.В. Крашенинников, И.Г. Стаханова

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

Аннотация. Рассматривается метод многочастотного радиопросвечивания ионосферы с использованием высокоэллиптических КА и наземных приемных модулей с особенностями его реализации в Арктическом регионе. Анализируются возможности метода, в частности, энергетический потенциал регистрации частоты отсечки с использованием, как классических импульсных сигналов, так и линейно-частотно модулированного излучения. Обсуждаются физические предпосылки реализации метода и модовая структура трансионограмм.

Abstract. The method of multi-frequency radio sounding of the ionosphere using HEO satellites and ground receiving module with the features of its implementation in the Arctic region is considered. The possibilities of the method are analyzed, in particular, the required energy potential for reliable registration of the cutoff frequency on a basis as classical pulse signals, so linearly frequency-modulated radiation. The physical prerequisites for the realization of the method and the transionogramm mode structure are discussed.

Введение

Мониторинг ионосферы с помощью космических аппаратов (КА) основан на разновидности традиционного вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, при которой ионозонд располагается на борту КА. Впервые эта идея была реализована в 1962 г. [Florida, 1969], после чего было произведено множество пусков КА с высотой орбиты от 508 до 3523 км с ионозондами на борту. Доказавший свою жизнеспособность и востребованность, метод получил название внешнее зондирование (topside sounding), или Вн3. Однако, при всех его бесспорных преимуществах, ему также присущ ряд специфических особенностей, ограничивающих его применение, в частности, в вопросах оперативной (в реальном времени) диагностики и краткосрочного прогноза состояния ОКП. Во-первых, большая скорость перемещения проекции низкоорбитальных КА вдоль земной поверхности (8 ÷ 12 км/с) не позволяет строго разделять временные и пространственные характеристики диагностируемой среды. Во-вторых, задержка между непосредственными измерениями параметров среды, сбросом данных в наземные пункты приема и первичной обработки информации с последующей выдачей результатов в аналитические центры может составлять довольно продолжительное время. В-третьих, ВнЗ определяет, фактически, два параметра: критическую частоту (foF2) и высоту максимума слоя F2 в подспутниковой точке. Структура внутренней ионосферы остается недоступна контролю. Вчетвертых, появление КА в зоне прямой видимости над каждым фиксированным пунктом наблюдений (или приема информации) происходит крайне ограниченное время (20÷25 мин), притом, вследствие смещения орбиты по долготе, не чаще одного раза в сутки.

В работах [Гивишвили и Иванов-Холодный, 1988; Гивишвили, 1994] был предложен альтернативный метод ионозондового мониторинга ионосферы с помощью использования КА на геостационарной или Энергетические высокоэллиптической орбите. аспекты проблемы тансионосферного радиозондирования для геостационарного КА рассматривались в [Гивишвили и др., 2012] и была предложена реализация метода на основе использования линейно-частотно модулированного сигнала. В данной работе рассматриваются базовые основы метода многочастотного радиопросвечивания радиозондирования) ионосферы (трансионосферного c высокоэллиптических спутников применительно к Арктическому региону.

Метод МРПИ – альтернативное решение

Метод включает в себя: а) ставку исключительно на просвечивание ионосферы на частотах декаметрового диапазона, близких к границе радиопрозрачности, что исключает резонансное взаимодействие (зондирование) между средой и радиоволной; б) разделение радиопередающих и радиоприемных устройств. Тем самым: а) источником информации становится не традиционная ионограмма, а ионограмма, фиксирующая только сигналы радипросвечивания; б) инструментом измерения становится не ионозонд, а система из одного широкополосного бортового передающего модуля (БПМ) и сети из наземных приемных

модулей (НПМ), синхронизированных с бортовым БПМ. Так как в данном случае на земной поверхности регистрируются лишь сигналы, не испытавшие полного внутреннего отражения, метод назван многочастотным радиопросвечиванием ионосферы (МРПИ).

Благодаря высокой стабильности мощности излучаемых сигналов метод МРПИ представляет собой аналог многочастотного искусственного риометра (измерителя уровня поглощения космического радиоизлучения). Сигналы, регистрируемые в методе МРПИ, несут больше информации и обладают существенно большей чувствительностью, нежели используемые в практике традиционных риометрических измерений. Это особенно актуально для полярной ионосферы, которая регулярно подвергается разнообразным возмущениям в нижней ионосфере (эффекты аномального поглощения - ППШ и АП) и в слое F2 (во время ионосферных и магнитосферных бурь и суббурь), вносящим заметные погрешности в функционирование навигационных систем *GPS* и ГЛОНАСС в арктическом регионе.

Зависимость группового пути от частоты - P'(f), в данном случае, есть ионограмма радиопросвечивания (или трансионограмма), которая, в общем случае, представляет собой более простой объект, нежели ионограммы вертикального и наклонного радиозондирования, что позволяет надеяться на автоматизацию процесса распознавания ее структуры, интерпретации и обработки. Таким образом, в каждом текущем сеансе измерений на каждом из k НПМ определяются следующие характеристики:

- $1.\,fc$ частота отсечки, равная наинизшей частоте (НЧ) прошедших сквозь ионосферу сигналов, которая, как показано ниже, связанна со значением foF2 в локальной области пересечения луча зрения на спутник и главного ионосферного максимума, что дает возможность использовать адаптационные процедуры в модельном представлении ионосферы и, в частности, более корректно рассчитывать максимально применимую частоту радиосвязи (МПЧ);
- $2.\ L(f)$ частотная зависимость поглощения трансионосферных сигналов, позволяющая с высокой точностью оценивать энергетику КВ-сигналов, распространяющихся в полярной зоне и вычислять интегральное состояние фактора ионосферного поглощения.

Проблемы энергетического обеспечения метода

Энергетическая проблема является решающим фактором в надежности регистрации виде ионограмм многочастотного радиопросвечивания ионосферы (трансионограмм) на трассе высокоапогейный КА – земная поверхность и рассмотрим ее на примере численного эксперимента со спутником, находящемся над Северным полюсом с высотами локализации: 10000, 20000 и 30000 км и приемом в п. Диксон (73° N, 80° E). Дальность по земной поверхности между излучателем и приемником ~ 1900 км. Расчеты выполнялись в глобальной модели ионосферы СМИ-88 для марта 2016 г. (весеннее равноденствие) с индексом солнечной активности Rz = 50. Технология моделирования в принципиальной форме описана в [Кища и ∂p ., 1993] и различие состоит только в высоте источника излучения над земной поверхностью. Лучевые траектории, по которым формируется волновое поле для частот вблизи границы радиопрозрачности ионосферы, представлены на рис. 1 и видно, что наибольшее воздействие ионосферной плазмы на зондирующие волны происходит в окрестности главного ионосферного максимума.

Учитывались следующие факторы в формировании энергетических характеристик волнового поля, задаваемого стандартным излучателем мощностью 1 кВт с полосой 1 кГц: геометрооптическая (пространственная) расходимость и поглощение в ионосфере через частоту столкновений электронов с ионами и нейтральными молекулами газов. В силу большого расстояния от спутника до приемного пункта фактор расходимости является определяющим в итоговой напряженности волнового поля – он более чем на четыре порядка превосходит столкновительные потери волны в ионосферной плазме. Антенны как передающая на спутнике, так и приемная на Земле предполагались изотропными, и использование реальных антенн, особенно на приемном конце радиотрассы, может дать существенный выигрыш в задаче выделения зондирующего сигнала. Соотношение сигнал/шум (SNR) рассчитывалось по методике, использованной в

[Гивишвили и ∂p ., 2012] для геостационарного КА и пренебрегалось антропогенным источником электромагнитного шума в силу его малости в Арктическом регионе.

На рис. 2 приведены результаты в виде синтезированных трансионограмм для локальных полудня (левая панель) и полуночи (правая панель) для высоты локализации КА в 30 000 км. Хорошо видно, что на частоте отсечки уменьшается как напряженность поля, что связано с антиволноводным распространением вдоль максимума слоя F2 (рис. 1), так и SNR, причем для полуночи SNR даже меньше, чем для полудня, в силу возрастания электромагнитных шумов с уменьшением частоты. Антиволноводное распространение характеризуется повышенной расходимостью радиоволны и появлением неустойчивости лучевой трубки, что проявляется в флуктуациях напряженности волнового поля.

В реальной практике радиозондирования ионосферы частотная полоса применяемых сигналов значительно больше — для простых импульсных посылок она составляет $\sim 10~\rm k\Gamma \mu$ и такой сигнал уже будет ниже уровня шумов в окрестности частоты отсечки. Кроме того, излучение импульсных сигналов относительно большой мощности может создавать проблемы электромагнитной совместимости с другой измерительной и управляющей аппаратурой, находящейся на борту КА. Альтернативой подход состоит в использовании

структурированных широкополосных сигналов. Однако в данной ситуации сложно рассчитывать на фазокодоманипулированный (ФКМ) сигнал, поскольку его применение требует расширенной полосы приемника ~ 30 кГц, а выигрыш за счет увеличенной базы составляет ~ 13-15 дБ. В настоящее время в практике наклонного радиозондирования ионосферы, в том числе и на больших расстояниях и в тонких экспериментальных исследованиях по ракурсному рассеянию диагностического радиоизлучения на искусственно генерируемых мелкомасштабных неоднородностях, апробированным средством является использование ЛЧМ-сигнала [Вертоградов и др., 2010]. При этом существенно (до 3- 5 мин.) при стандартной в ионосферных исследованиях скорости 100 кГц/сек увеличивается время зондирования. Тем не менее, принимая во внимание, что положение высокоорбитального ИСЗ над земной поверхностью мало меняется на таком масштабе времени, подобное удлинение сеанса зондирования не является неприемлемым. Коэффициент выигрыша (SNR) в технологии ЛЧМ-сигнала составляет ~ 30 дБ. Уменьшение мощности излучения до 100 Вт дает уменьшение SNR на 10 дБ, но, даже уменьшая ее на порядок величины (увеличивается частотная полоса сигнала на этапе обработки), можно рассчитывать на увеличение соотношения сигнал/шум на 10 дБ, что уже вполне достаточно для надежного приема сигнала. Дальнейшее увеличение этого параметра возможно только за счет коэффициента усиления приемной антенны, которое, например, для ФАР, состоящей из 4-х горизонтальных диполей может составлять 10-12 дБ.

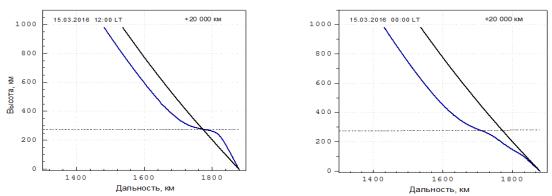


Рисунок 1. Лучевые траектории для луча прямого зрения на спутник и для частоты вблизи границы радиопрозрачности ионосферы: слева – локальный полдень, справа – локальная полночь.

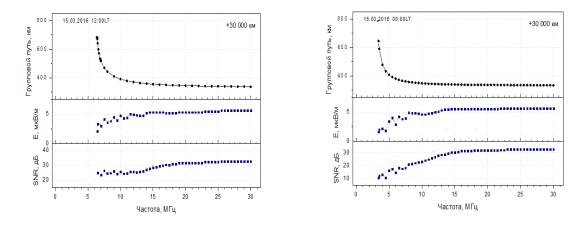


Рисунок 2. Трансионограммы с энергетическими характеристиками в точке приема: напряженностью волнового поля и соотношением сигнал/шум: слева – локальный полдень, справа – локальная полночь.

Оценки SNR дают основание полагать, что энергетически проект МРПИ реализуем, что согласуется с экспериментами по радиомаяковым измерения с геостационарных КА на частотах $40 \div 41$ МГц [Солодовников и др., 1988].

Структура трансионограммы

На рис. 2 представлен основной след синтезированной трансионограммы в изотропном приближении показателя преломления. В реальных условиях наиболее сильным фактором, усложняющим структуру трансионограммы, будет геомагнитное поле — появится магнитоионное расщепление в форме О- и Х-компонент (рис. 3). Величина расщепления будет несколько больше, чем на средних широтах ~ 1 МГц, что

связано как с большим значением модуля гирочастоты, так и характерными условиями распространения радиоволн – в более значительной степени реализуется случай квазипродольного распространения. Другим фактором, способным привести к формирования дополнительных следов в трансионограмме является горизонтальная неоднородность ионосферы высоких широт. Такие следы, в отличие от базового, могут существовать только в довольно узком частотном диапазоне. Так, для локально-полуденного случая (рис. 1), высока вероятность формирования комбинированной моды со вторым скачком, обусловленным отражением от ионосферы вследствие роста электронной плотности в направлении на приемник. При определенной конфигурации положений излучающих и приемных средств может проявиться влияние полярной стенки главного ионосферного провала, для которой продольная неоднородность (градиент) весьма существенен.

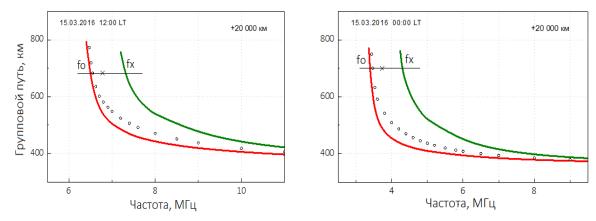


Рисунок 3. Синтезированные трансионограммы с учетом магнитоионного расщепления зондирующих волн в области максимального изменении группового пути: левая панель — локальный полдень, правая панель — локальная полночь. Светлыми кружочками отмечен след в изотропном приближении показателя преломления.

Заключение

Рассмотрен метод диагностики ионосферы в Арктическом регионе, основанный на радиопросвечивании (РПС) ионосферы сигналами переменной частоты декаметрового диапазона. Сигналы излучаются с борта высокоапогейного КА и принимаются на земной поверхности. Результаты их анализа фиксируются в виде ионограмм РПС в противоположность известным ионограммам ВЗ, НЗ или ВнЗ. Достоинства метода МРПИ заключаются в:

- относительной простоте реализации;
- использовании недорогой передающей и приемной техники и антенн;
- простой структуре ионограмм радиопросвечивания (РПС);
- однозначности регистрируемых характеристик, оперативности их обработки.

Тем самым, появляется возможность практически решить проблему мониторинга ионосферы в арктической зоне Российской Федерации.

Литература

- 1. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., и др. Диагностика искусственно-возмущенной ионосферы с помощью современной техники зондирования. Электромагнитные волны и электронные системы. Выпуск: Проблемы космических исследований. 2010. Т.15. С. 22–29.
- 2. Гивишвили Г. В., Иванов-Холодный Г.С. Авторское свидетельство № 1443619 от 08. 08. 1988.
- 3. Гивишвили Г.В. Многочастотное просвечивание ионосферы новый метод глобальной диагностики ионосферы в реальном времени. // Космические исследования. Т. 32. Вы.4-5. С. 142-149. 1994.
- 4. Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Крашенинников И.В. Дистанционное зондирование ионосферы в декаметровом диапазоне с геостационарного ИСЗ // Геомагнетизм и аэрономия. М.: Наука. Т. 52. № 4. С. 519-524. 2012.
- 5. Кища П.В., Крашенинников И.В., Лукашкин В.М. Моделирование многочастотного распространения КВсигналов в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия, 1993. Т.33. №1. С. 158-162.
- 6. Солодовников Г.К., Синельников В.М., Крохмальников Е.Б. Дистанционное зондирование Земли с использованием радиомаяковых космических аппаратов. М. Наука. 1988 г.
- 7. Florida C.D. The development of a series of ionosphere satellites // Proc. IEEE/ V. 57, № 6, P.867-875, 1969.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ЧАСТОТЫ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА

Е.С. Гончаров 1 , А.Н. Ляхов 2 , Т.В. Лосева 1,2

 1 ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Духова", Москва, Россия

 2 ФГБУН "Институт динамики геосфер", Москва, Россия, e-mail: eggoncharov@yandex.ru

Аннотация. В данной статье описывается построение программного модуля для расчета параметров резонанса в сферической полости Земля-ионосфера методом конечных элементов в трехмерной постановке. В случае невозмущенной ионосферы Шумановский резонанс рассчитывался с использованием двух различных моделей D-слоя. Результат показывает хорошее согласие с экспериментом. Также, с помощью одной из моделей получены параметры резонанса при солнечных вспышках различных классов. На основе этих данных выявлена зависимость собственных частот от интенсивности солнечной вспышки.

Abstract. This paper presents a procedure to carry out three-dimensional (3D) finite element model full wave simulations of the electromagnetic field in spherical shell between the Earth's surface and top boundary of D-layer of the ionosphere. Numerical simulations have been performed in the frequency domain. For non-perturbed ionosphere, calculations have been carried out using two models of D-layer of the ionosphere. The obtained results are in agreement with experimental data. Also using one these models, parameters of Schumann resonance during solar flares of different classes have been received. Based on calculations, dependence between eigenfrequencies and level of solar flares has been revealed.

Введение

В области сверхнизких частот (5-40 Гц) распространение электромагнитных волн происходит специфическим образом. Благодаря тому, что длина волны соизмерима с радиусом Земли, в СНЧ диапазоне могут наблюдаться глобальные резонансы, когда частота колебаний совпадает с собственной частотой резонатора, образованного сферической полостью между Землей и ионосферой. Так называемые, Шумановские колебания образуют систему стоячих волн, охватывающих весь земной шар, поэтому характеристики СНЧ колебаний, наблюдаемые в любом пункте, зависят от состояния ионосферы над всеми другими частями земного шара. Следовательно, изучение резонансных колебаний позволило бы определять глобальные параметры ионосферы, характеризующие ее состояние в целом.

Постановка задачи

Исследуемый резонатор представляет собой полость между двумя концентрическими сферами радиусами 6370 км (Земля) и 6470 км (верхняя граница D-слоя ионосферы). Таким образом, толщина резонатора составляет 100 км. Поиск собственных частот резонатора реализуется в пакете COMSOL Multiphysics[®] за счет решения методом конечных элементов волнового уравнения (1), полученного из системы уравнений Максвелла. В результате расчета получаются комплексные значения частот (2).

При построении моделей для изучения Шумановского резонанса критерием корректности обычно является совпадение набора рассчитанных собственных частот f_n , а также их добротностей Q_n (3) с экспериментальными значениями.

$$\nabla \times \mu_r^{-1} \left(\nabla \times \vec{E} \right) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{i\sigma'}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = \mathbf{0}$$
(1)

$$\widetilde{f_n} = f_n + i\delta$$
 (2)

$$Q_n = \frac{f_n}{2\delta} \tag{3}$$

В табл.1 представлены значения частот, рассчитанных для идеального, полого проводника. Полученные частоты, а также кратность их вырождения (2n+1, где n – номер частоты) совпадают с теоретическими значениями для идеального сферического проводника (Schumann, 1952):

$$f_n = 7.5\sqrt{n(n+1)}$$
. (4)

Значения реальных частот резонатора Земля-ионосфера отличаются от их теоретических значений. Это связано с тем фактом, что поверхность Земли и граница ионосферы не являются идеальными проводниками. Кроме того, ионосфера представляет собой многокомпонентную магнитоактивную плазму, неоднородную как в вертикальном, так и в поперечном направлении.

Электронная проводимость D-слоя ионосферы рассчитывалась в приближении низких частот:

$$\sigma(\mathbf{h}) = \frac{e^2 N_{\mathcal{E}} \nu_{\beta \dot{\phi} \dot{\phi}}}{m_{\mathcal{E}} \left(\omega^2 + \nu_{\beta \dot{\phi} \dot{\phi}}^2\right)} \approx \frac{e^2 N_{\mathcal{E}}}{\nu_{\beta \dot{\phi} \dot{\phi}} m_{\mathcal{E}}},$$
(5)

где h [км] — высота над поверхностью Земли, $m_{\mathfrak{g}}$ - заряд электрона, — эффективная частота соударений, $N_{\mathfrak{g}}$ - электронная концентрация. Распределение электронной концентрации $N_{\mathfrak{g}}$ и эффективных частот соударений в D-слое ионосферы для сравнения получены по двум моделям:

1) Общепринятое двупараметрическое экспоненциальное приближение (Wait and Spies, 1964):

$$\nu_{3\hat{\Phi}\hat{\Phi}}(h) = 1.86 \cdot 10^{11} exp(-0.15h).$$
 (7)

Параметры $H_{\mathfrak{P}}$ и β рассчитываются по эмпирической модели (Ferguson, 1980):

$$H_p = 74,37 - 8,087\cos\chi + 5,779\cos\theta + 1,213\cos\varphi - 0,0044\cdot X_4 - 6,035\cdot X_5,$$
(8)

$$\beta = 0.5349 - 0.1658\cos \chi - 0.0854\cos \theta + 0.1296 \cdot X_5, \tag{9}$$

где \mathcal{X} — солнечный зенитный угол, θ — географическая широта, $\varphi = 2\pi \frac{m - 0.5}{12}$ — учет сезонных вариаций (m — номер месяца), \mathcal{X}_{\bullet} — количество солнечных пятен, \mathcal{X}_{\bullet} — магнитная активность.

2) плазмохимическая 22-компонентная модель нижних слоев ионосферы, разработанная в ИДГ РАН

На рис.1 приводится сравнение дневных и ночных профилей электронной концентрации. Наблюдается абсолютное количественное и качественное расхождение профилей ночной стороны Земли. Профили дневной стороны совпадают только на высотах 70-100 км.

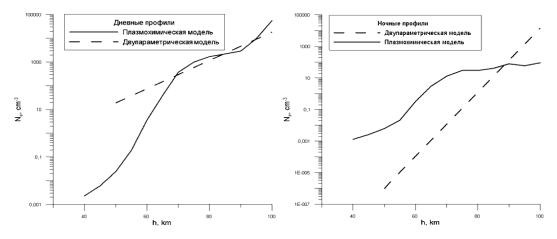


Рисунок 1. Сравнение профилей электронных концентраций по двум моделям: для дневной стороны Земли (слева), для ночной стороны Земли (справа).

Результаты

Расчеты проводились в пакете COMSOL Multiphysics® при помощи решателя MUMPS, на 28 ядерном компьютере с объемом ОЗУ 256 Гб. Получены параметры Шумановского резонанса по двум моделям при отсутствии ионосферных возмущений. Как видно из табл. 1, плазмохимическая модель D-слоя дает собственные частоты и добротности, близкие к эксперименту, в то время как двупараметрическая модель позволяет получить лишь приблизительную оценку.

Тоб	пипа	1

					полица 1
Номер собственной частоты	I	II	III	IV	V
Частоты полого резонатора с идеально проводящими стенками, Гц	10,5	18,2	25,7	33,2	40,6
Частоты, полученные по двупараметрической модели, Гц	8,6	15,1	21,6	28,0	34,5
Частоты, полученные по плазмохимической модели, Гц	7,7	13,7	19,6	25,6	31,5
Экспериментальные значения частот (Блиох и др., 1977), Гц	7,8	13,8	19,7	25,7	31,7
Добротности, полученные по двупараметрической модели	9,1	9,6	10,2	10,0	10,2
Добротности, полученные по плазмохимической модели	6,3	6,5	6,6	6,5	6,5
Экспериментальные значения добротностей (Блиох и др., 1977)	4,6	6,0	6,6	6,8	6,9

С помощью плазмохимической модели получены параметры D-слоя ионосферы при солнечных вспышках. Расчет параметров резонатора показал монотонный рост собственных частот резонатора с увеличением интенсивности солнечной вспышки. Однако даже при очень мощных солнечных вспышках рост собственных частот составляет не более 5%, аналогичная тенденция наблюдается и для добротностей. На рис. 3 представлена зависимость компонент первой частоты от интенсивности солнечного излучения. В табл. 2 приведено соответствие между интенсивностью солнечного рентгена и классом вспышки.

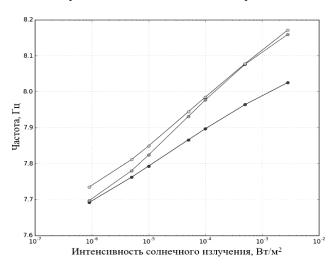


Рисунок 2. Зависимость мод первой собственной частоты (7,7 Гц) от интенсивности солнечной вспышки.

						Таблица 2
Класс вспышки	В9	C5	M1	M5	X1	X5
Интенсивность,	9 · 1 0 ⁻⁷	10 ⁻⁶	1 0 ⁻⁵	5 · 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴

Выводы

По итогам данной работы, для изучения резонанса Шумана создан программный модуль в системе COMSOL Multiphysics[®] для расчета собственных частот резонатора, образованного сферической полостью Земля-ионосфера, в трехмерной постановке. Проведены расчеты параметров резонансных частот для невозмущенной ионосферы, согласующиеся с экспериментом, а также расчеты при вспышках различных

классов. На основе полученных данных выявлена зависимость собственных частот от интенсивности солнечных вспышек.

Литература

- 1. Блиох П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф.: Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера, Наукова думка, Киев, 1977.
- 2. Ferguson J. A.: Ionospheric profiles for predicting nighttime VLF/LF propagation, Naval Ocean System Centre Tech. Rep. NOSC/TR 530, NTIS Accession.ADA085399. Natl. Tech. Inf. Serv. Springfield, VA 22161, USA, 1980.
- 3. Schumann, W.O.: Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist, Z. Naturforsch., 7a, 149-154, 1952.
- 4. Wait, J. R. and Spies, K. P.: NBS Technical Note300: Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, edited by: U. S. D. o. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology, NBS, 1964.

НАЗЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ПРОГНОЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

В.Г. Григорьев, С.А. Стародубцев, П.Ю. Гололобов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН», e-mail: grig@ikfia.sbras.ru

Аннотация. Представляются результаты исследований поведения компонент первых двух угловых моментов функции распределения космических лучей в периоды геомагнитных бурь, наблюдавшихся в 1997-2005 гг. и в 2015 г. Для определения параметров компонент использовался разработанный в ИКФИА СО РАН метод глобальной съемки, в котором мировая сеть нейтронных мониторов выступает как единый многонаправленный детектор космических лучей. В настоящее время, на основе базы данных измерений мировой сети нейтронных мониторов NMDB (http://www.nmdb.eu), метод глобальной съемки реализован авторами в режиме реального времени и проводится мониторинг предикторов геомагнитной возмущенности. Результаты прогноза геомагнитных бурь с Dst < -50 нT, на основе наземных измерений космических лучей, представлены в сети Интернет по адресу http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global survey real time.html.

Abstract. The results of investigation of behavior of first two angular moments of the cosmic ray distribution function during geomagnetic storms, which were observed in 1997-2005 and in 2015, are presented. In order to define the parameters of the components the method of global survey, which was developed in ShICRA SB RAS, was used. The method allows to consider the world-wide network of neutron monitors as a single multidirectional detector of cosmic rays. At the current moment, on the basis of world neutron monitor database NMDB (http://www.nmdb.eu), the method of global survey is realized in real-time mode and the monitoring of geomagnetic disturbance predictors is helding. The results of forecasting of geomagnetic storms with Dst<-50 nT, on the basis of ground-based measurements of cosmic rays, are presented in the Internet through the web-link http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html.

Введение

Одним из основных направлений в области исследований вариаций интенсивности космических лучей (КЛ) является космическая погода. Для большого количества событий попадания Земли в крупномасштабные возмущения солнечного ветра выявлены предвестники - характерные изменения интенсивности и углового распределения галактических КЛ [1-5]. На основе этих результатов, по данным измерений нейтронной и мюонной компонент интенсивности КЛ в одном пункте наблюдения – Якутском спектрографе КЛ им. А.И. Кузьмина, авторами была создана и реализована методика прогноза крупномасштабных возмущений солнечного ветра в реальном времени [6]. В работе [7], нами проведено исследование поведений векторов радиальной X_{II} и азимутальной Y_{II} компонент суточной анизотропии КЛ A_{II} перед началом 25 геомагнитных бурь с амплитудой \leq -50нT, наблюдавшихся в 2012-2013 гг. Установлено, что за период от нескольких часов до 2-х суток, перед началом большинства геомагнитных бурь, в поведении этих векторов отмечаются значительные изменения, которые не наблюдаются в периоды спокойного солнечного ветра. Однако использование этих изменений в качестве предикторов геомагнитных возмущений имеет серьезный недостаток - они проявляются и при приближении к Земле возмущений межпланетной среды, которые не сопровождаются геомагнитными бурями.

Разработанный в ИКФИА метод глобальной съемки [8], на основе измерений мировой сети нейтронных мониторов, позволяет определять первые 9 компонент функции углового распределения КЛ за каждый час наблюдений. Создание и развитие базы данных сети нейтронных мониторов NMDB (http://www.nmdb.eu) дало возможность использовать этот метод в режиме реального времени [8]. В данной работе представлены результаты исследований поведения зональных компонент распределения КЛ С₀₀, С¹₀ и С₂₀, полученных методом глобальной съемки, в периоды геомагнитных бурь, наблюдавшихся в 1997-2005 гг. и в 2015 г. Компоненты С₀₀, С¹₀ и С₂₀ отражают зональные компоненты изотропной части и первых двух сферических гармоник распределения КЛ, соответственно. Результаты анализа позволили реализовать методику краткосрочного (от нескольких часов до ~1 суток) прогноза геомагнитных бурь в реальном времени.

Экспериментальные данные

Колебания часовых значений амплитуд зональных компонент С₀₀, С₁₀, полученные методом глобальной съемки в спокойные от геомагнитных бурь периоды, относительно среднего происходят в пределах до

 $\pm 0.4\%$ для минимума и $\pm 0.7\%$ для максимума солнечной активности [9]. В периоды геомагнитных бурь колебания амплитуд указанных зональных компонент значительно больше вышеприведенных значений и они наблюдаются еще до начала главной фазы геомагнитной бури. Перед началом геомагнитного возмущения происходит, в основном, увеличение положительной части амплитуды, а затем отрицательной, которая наблюдается уже на фазе понижения Dst-индекса геомагнитной возмущенности (Рис. 1).

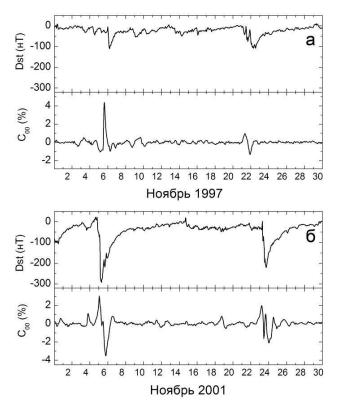


Рисунок 1. Dst-вариации геомагнитного поля и поведение зональной компоненты C00 в возмущенные периоды геомагнитной активности для минимума (а) и максимума (б) солнечной активности.

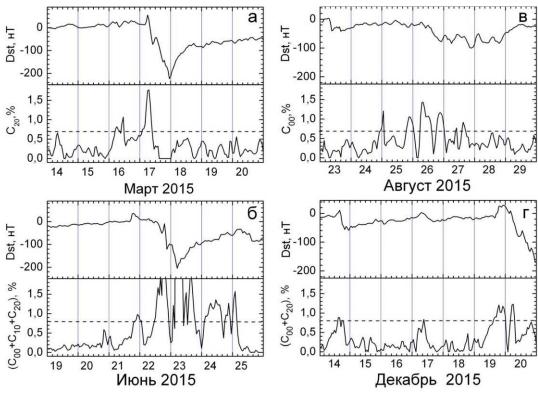


Рисунок. 2. Примеры Dst-вариации и возрастаний положительных значений амплитуд различных зональных компонент распределения КЛ во время геомагнитных бурь.

При этом было отмечено [9], что по данным анализа поведения компонент C_{00} и C_{10} в периоды 56 больших геомагнитных бурь, наблюдавшихся в 1997-2005 гг., вероятность и средняя заблаговременность обнаружения предиктора перед началом геомагнитных возмущений с амплитудой $Dst \leq -100$ нТ составляют 0.75 и 10 часов, соответственно. Проведенные нами дальнейшие исследования поведения 3-х зональных компонент C_{00} , C_{10} и C_{20} до начала и в периоды геомагнитных бурь, наблюдавшихся в 2015 г., показали, что увеличение положительного значения (>0.7%) любой одной из этих компонент практически всегда предшествует началу магнитной бури. При этом указанные увеличения могут проявляться в одной, двух или во всех трех компонентах распределения КЛ - C_{00} , C_{10} и C_{20} . Анализ динамики этих возрастаний, позволил выработать также критерий для их одновременной положительной суммы (>0.8%) и который может быть использован как предиктор магнитной бури. На Рис. 2 приведены примеры поведения вариации Dst-индекса во время геомагнитных бурь и возрастаний положительных значений амплитуд отдельной и суммы различных зональных компонент распределения КЛ, которые мы рассматриваем как предикторы возмущения геомагнитного поля. Горизонтальными штриховыми линиями указаны уровни, превышения над которыми отдельных или суммарных положительных значений зональных компонент можно считать указанием на появление предиктора геомагнитной бури.

Как следует из Рис. 2, предиктором геомагнитных возмущений может являться наблюдаемое увеличение как одной положительной (а, в), так и суммы положительных различных двух (г) или всех трех зональных компонент C_{00} , C_{10} и C_{20} (б). В приведенных примерах, периоды опережения предикторами начала геомагнитных возмущений, составляют от 3-х часов до 1.5 суток. Установлено, что для исследованных 25 геомагнитных бурь, наблюдавшихся в 2015 г. с амплитудами Dst < -50 нT, предикторы имели 19 возмущений (вероятность прогноза составила ≈ 0.75). При этом, для 4 бурь с амплитудой Dst < -100 нT, она равна 1. Следует также отметить, что количество проявлений ложных предикторов составляет около 20% от их общего числа.

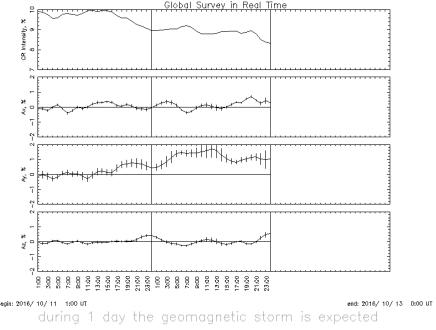


Рисунок 3. Пример прогноза геомагнитной бури в октябре 2016 г.

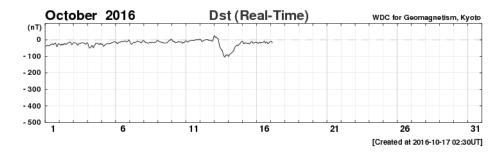


Рисунок 4. Проявление геомагнитной бури 13 октября 2016 г. в Dst-индексе (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/presentmonth/index.html).

В настоящее время на основе метода глобальной съемки и использования базы данных NMDB, нами проводится непрерывный мониторинг КЛ и прогноз геомагнитных бурь. Их результаты в режиме реального времени доступны в сети Интернет http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html. В качестве примера, на Рис. З приведен скрин-шот веб-страницы мониторинга по определению текущих часовых параметров анизотропии КЛ в октябре 2016 г. На нем показаны зависимости от времени изотропной интенсивности (CR intensity), азимутальной Ау, радиальной Ах и северо-южной Аz компонент суточной вариации КЛ в GSE системе координат. Вертикальными линиями указаны ошибки. Внизу Рис. З выведено предупреждение о возможном начале магнитной бури в течение ближайших суток. Действительно, согласно информации мирового центра данных по геомагнетизму (г. Киото, Япония) спустя 7 часов после предупреждения началась магнитная буря (Рис. 4).

Заключение

По результатам анализа динамики поведения компонент распределения КЛ, полученных методом глобальной съемки на основе базы данных нейтронных мониторов NMDB в режиме реального времени, реализована новая методика прогноза геомагнитных бурь.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №15-42-05085-р_восток_а, 15-42-05083-р_восток_а и Программы Президиума РАН №23. Авторы благодарят команду NMDB-database (http://www.nmdb.eu), поддержанную программой FP7 Европейского Союза (контракт № 213007), за обеспечение данными мировой сети нейтронных мониторов и мировой центр данных по геомагнетизму (г. Киото, Япония) в режиме реального времени.

Литература

- 1. Dorman L.I., Belov A.V., Eroshenko E.A et al. Possible cosmic ray using for forecasting of major geomagnetic storms, accompanied by Forbush-effects. Proc. 28th Intern. Cosmic Ray Conf., Tsukuba, V. 6, P. 3553–3556, 2003
- 2. Munakata K., Kuwabara T., Yasue S. et al. A "loss cone" precursor of an approaching shock observed by a cosmic ray muon hodoscope on October 28, 2003. Geophys. Res. Lett., V. 32, L03S04, 2005.
- 3. Belov A.V, Bieber J.W., Eroshenko E.A. et al. Pitch-angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: neutron monitor observations. Proc. 27-th Int. Cosmic Ray Conf., Hamburg, V. 9, P.3507-3510, 2001.
- 4. Munakata K., Bieber J.W., Yasue S. et al. Precusors of geomagnetic storms observed by the muon detector network. J. Geophys. Res., V. 105, P. 27457-27468, 2000.
- 5. Grigoryev V.G., Starodubsev S.A., Krivoshapkin P.A. et al. Cosmic ray anisotropy based on Yakutsk station in real time. Adv. Space Res., V.41, P. 943–946, 2008.
- 6. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Кривошапкин П.А.и др. Анизотропия космических лучей по данным станции Якутск в реальном времени. Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности. Тр. Всероссийской конференции, Троицк: ИЗМИРАН, С.79-84, 2006.
- 7. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Изв. РАН. Сер. физ. Т.79. С. 703-707. 2015.
- 8. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука. 224С. 1981.
- 9. Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Yu. Dynamics of zonal components of cosmic ray distribution during geomagnetic storm periods. Proc. Sci., PoS (ICRC2015)076, 2016.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕШНЕГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ИОНОСФЕРЫ С ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ИСЗ

Н.П. Данилкин, Г.А. Жбанков, В.Б. Лапшин, И.В. Романов, М.Ю. Филиппов

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, 129128, ул. Ростокинская 9, e-mail: nickdanilkin8@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются базовые принципы организации внешнего радиозондирования ионосферы и устройства ионозондов для космических аппаратов на высокоэллиптической орбите. Анализируются трудности при реализации такого радиозондирования и способы их преодоления.

Abstract. Basic organize principles of the topside ionosphere sounding with the high elliptical orbit spacecraft are looking. The difficulties of this method are analysed and proposed way of solutions.

Мониторинг арктической ионосферы спутниковыми ионозондами на высокоэллиптических орбитах делает возможным непрерывное наблюдение исследуемой зоны в течение времени, позволяющего регистрировать динамику развития ионосферных неоднородностей. Однако при этом появляются новые проблемы, которые сосредоточены в следующих вопросах:

- 1. Время распространения.
- 2. Ослабление радиоволн.
- 3. Увеличение области отражения сигналов.

Для проведения мониторинга на высокоэллиптических орбитах (ВЭО) в арктическом регионе РФ предлагается размещение ионозонда на двух спутниках «Арктика-М» с параметрами орбит:

Высота апогея, км	40 000
Высота перигея, км	1 000
Наклонение, град	63
Период обращения, часов	12

Восходящий узел одного аппарата совпадает с нисходящим узлом другого. Расположение рабочих участков соответственно за 3,2 часа до апогея и 3,2 часа после апогея. Таким образом, обеспечивается постоянное с перекрытием 0,2 часа нахождение на рабочем участке одного из спутников системы.

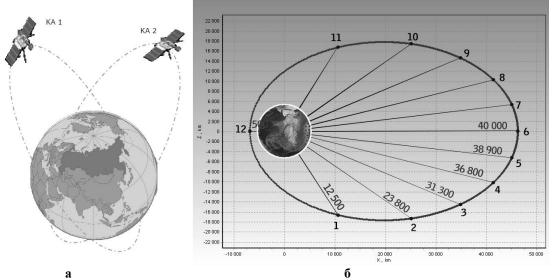


Рисунок 1. Схема высокоэллиптической орбиты спутниковой системы «Арктика-М». **a** – общий вид; **б** – траектория (красным указано расстояние до поверхности Земли, черным часы).

На рисунке 1 показано взаимное расположение орбит спутников «Арктика- М» №1 и №2, а также расстояние до поверхности Земли в зависимости от времени (точки стоят через каждый час).

Рассмотрим их более детально указанные выше проблемы в приложении конкретной ВЭО.

- 1. При высокоорбитальном внешнем радиозондировании арктической ионосферы в апогее траектории время распространения до отражения и обратно резко увеличивается при сравнении со спутниками на круговых орбитах с высотой около 1000 км. Эта трудность может быть разрешена применением специальных видов кодирования радиосигналов [1]. В нашем случае используются ФКМ-импульсы. При этом заполняются промежутки «пустого» времени распространения между зондирующими импульсами на различных частотах, не дожидаясь отклика ионосферного эха. Также необходима интеллектуальная система регистрации ионограммы в зависимости от переменной дальности до ионосферы при движении спутника по орбите для исключения на ионограммах «пустого» пространства, на котором отсутствуют следы отраженных сигналов. Для спутников «Арктика-М» произведены расчеты основных параметров, касающихся реализации схемы зондирования, включая расчеты заполнения, расчеты энергетики, параметры ФКМ.
- 2. Эхо-сигналы от высот вблизи апогея будут значительно ослаблены. Например, для дальности 40 000 км (спутники «Арктика-М») в традиционном диапазоне 1-20 МГц ослабление из-за сферичности фронта радиоволны на пути распространения спутник—ионосфера—спутник составит от 120 дБ (1 МГц) до 160 дБ (20 Мгц). Решение предлагается в виде комбинации подходов: используется ФКМ сигналы, применяются схемы накопления импульсов [1, 2] и планируется использование бортовых антенн с направленным излучением. В высокочастотной области указанного диапазона, где ослабление значительнее, а зондирующие импульсы будут иметь частоту заведомо большую плазменной, планируется в дополнение к внешнему вертикальному зондированию реализовать регистрацию ионограмм внешнего трансионосферного зондирования на наземных пунктах приема. Это частично разрешит также следующую проблему.
- 3. Увеличение области отражения сигналов. Отраженный от ионосферы сигнал формируется областью, размеры которой совпадают с размерами первой зоны Френеля. При высокоэллиптической орбите ионозонда эта область изменяется в зависимости от высоты расположения ионозонда над Землей в размерах. Условие однородности ионосферы в зоне отражения с увеличением высоты расположения спутника также меняются. Это приводит к тому, что доля рассеянных сигналов с увеличением высоты ионозонда будет расти. Однако, эксперимент на ИСЗ «Ітаде» [4] показал, что до высот в 5 земных радиусов наблюдается довольно часто сигнал с долей рассеяния, которая не препятствует в дальнейшем расчету Nh-профилей ионосферы. Моделирование ионограмм внешнего зондирования с высот 40 000 км, с учетом ионосферных неоднородностей размеров порядка диаметра первой зоной Френеля, проведенное в [1] показывает возможность регистрации параметров таких неоднородностей. Результаты моделирования внешнего радиозондирования приведены на рис. 2.

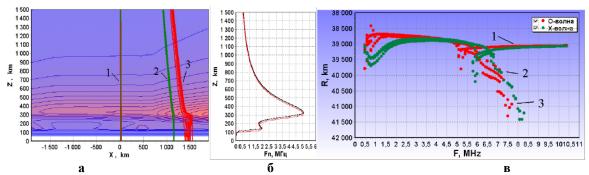


Рисунок 2. Моделирование зондирования ионосферы из апогея высокоэллиптической орбиты (высота над поверхностью Земли 40 000 км) **a**) расчет лучевых траекторий на частоте 7,5 МГц; **б**) используемый для моделирования Nh-профиль плазменных частот; **в**) модельная ионограмма.

Для зондирования предлагается использовать бортовой вариант ионозонда «Томион» [3]. Применяется излучение зондирующего сигнала сразу на нескольких некратных рабочих частотах, которые могут быть выделены с помощью фильтрации. Это позволит ускорить процесс регистрации ионограммы. Предлагается использовать двухканальный приемник и поляризационную антенную систему с возможностью разделения обеих магниторасщепленных компонент эхо-сигнала.

Принятый антенной эхо-сигнал поступает в переключатель (коммутатор), затем на вход преселектора, в котором подавляются частоты вне рабочего диапазона. Он усиливается низкошумящим предварительным усилителем и поступает на входа супергетеродинных приёмников с двойным преобразованием частоты (М штук). Количество каналов М выбираются исходя из числа излучаемых одновременно в группе частот и полосы оцифровки АЦП. Опорные частоты, необходимые для переноса на промежуточные частоты fl.М и

f1.М формируются синтезаторами частот, участвующими при формировании зондирующего импульса на передатчике [1]. На рисунке 3 представлена схема, реализующая описанный алгоритм.

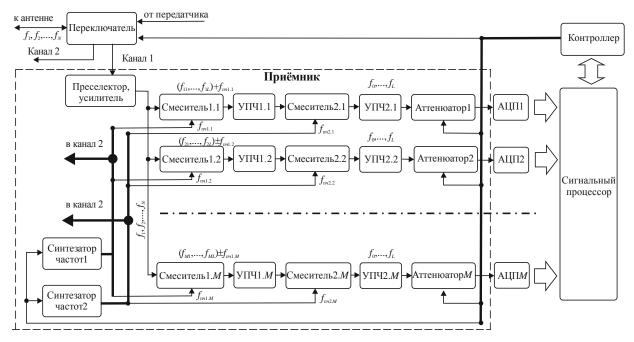


Рисунок 3. Схема построения бортового ионозонда для высокоэллиптического спутника.

Предложенная схема бортового ионозонда отрабатывается (симулируется) на ионозонде наземного базирования «Томион» и отражениях от внутренней ионосферы, получаемых при ВЗ. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

Литература

- 1. Н.П. Данилкин, Г.А. Жбанков, С.В. Журавлев, Н.Г. Котонаева, В.Б. Лапшин, И.В. Романов Мониторинг ионосферы в Арктике на основе спутниковых ионозондов // Гелиогеофизические исследования. 14, с 31-45, 2015
- 2. С.А. Колесник, И.В. Романов, М.В. Пикалов, Р.К. Хаитов, М.Ю. Филиппов Минимизация длительности сеанса внешнего радиозондирования ионосферы с ИСЗ на высокоэллиптической орбите // Гелиогеофизические исследования. 14, с 46–52, 2016
- 3. С.А. Колесник, А.А. Колмаков, В.Т. Сарычев, Р.К. Хаитов Сетевой ионозонд для определения пространственно-временного распределения параметров ионосферы Земли // Гелиогеофизические исследования, 4, с 90–100. 2013
- 4. B.W. Reinisch, ets. "First results from the Radio Plasma Imager on IMAGE" Geophysical Research Letters 28(6) · March 2001.

ВЫСОКОЭНЕРГИНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАЗРЯДОВ В ПОЛЯРНОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А.Ф. Июдин 1 , В.В. Богомолов 1,2 , Г.Г. Гарипов 1 , И.А. Максимов 1 , А.К. Маркелова 1 , К.Ю. Салеев 1,2 , С.И. Свертилов 1,2 , И.В. Яшин 1

¹Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2 ²Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2 e-mail: sis@coronas.ru

Аннотация. Рассматривается проект совместных наблюдений высотных электромагнитных разрядов, в том числе и в полярном регионе, в ходе наземных и космических экспериментов. Атмосферные электрические разряды могут сопровождаться генерацией высокоэнергичных излучений - гамма-квантов, электронов, возможно протонов и нейтронов. Поэтому комплексное изучение высокоэнергичных излучений электрических разрядов представляется важной задачей. Одновременная регистрация ультрафиолетового и инфракрасного излучения разрядов, а также радиоизлучения и измерение напряженности электрического поля над установкой является эффективным методом исследований благодаря относительно низкому поглощению оптического излучения в атмосфере и относительно высокому отношению сигнала к шуму по сравнению с радиоизлучением. Проект предполагает развертывание вдоль меридиана, включая полярные области, сети станций с однотипным оборудованием, включающим детектор для регистрации ультрафиолетового и инфракрасного излучения транзиентных оптических явлений, детекторов рентненовского, гамма-излучеия и электронов, датчиков радиоизлучения, электричсекого и магнитного полей. Предполагется установка такого же оборудования на метеорологичнеских зондах и космичсеких аппаратах, функционирующих на полярных орбитах, и проведение одновременных наблюдений наземными средствами, на спутниках и метеорологических зондах. В ходе подготовки проекта предполагается провести тщательный анализ результатов исследования атмосферных транзиентных явлений и высыпаий магнитосферных электронов на полярных космических аппаратах «Вернов» и «Ломоносов» совместно с данными наземных станций.

Abstract. The project of joint observations of high altitude electromagnetic discharges including those ones in the Polar Region during the ground and space experiments is discussed. The Atmosphere electric discharges can be accompanied by generation of high energy radiation such as gamma quanta, electrons and possibly protons and neutrons. Thus, the complex study of high energy radiation of electric discharges is very important. Simultaneous detection of ultraviolet and infrared discharge emission as well as of radio emission and measurements of electric field above the instrument is very effective experimental technique due to the sufficiently low attenuation of the optical emission in the Atmosphere and its sufficiently high signal to noise ratio in comparison with radio emission. The project assumes deployment along meridian including the Polar Region the number of stations with identical equipment including the ultraviolet and infrared detector for transient lightning event study, detectors of X rays, gamma rays and electrons, radio wave, electric and magnetic field meters. It is also supposed to put the same instruments on the meteorological probes and spacecrafts operating on the polar orbits and to realize the simultaneous ground, high altitude by meteorological probes and space observations. During the project preparation, it is supposed to make the detailed analysis of the results of the Atmosphere transient phenomenon and magnetosphere electron precipitation study on the polar satellites Vernov and Lomonosov together with ground experiment data.

Введение

Исследования грозовых разрядов являются 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 такназываемых 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,

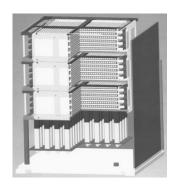
установленными на самолеты или на высотные аэростаты различных размеров и назначения.

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 субрелятивистских 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 (*Руссе-Дюпре, Гуревич*, 1996; *Двайер и др.*, 2012; *Сингх и др.*, 2015), 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.

Не определена до конца и роль грозовых разрядов в заполнении радиационного пояса Земли высокоэнергичными электронами. В дополнение к обычным молниям обнаружены новые типы разрядов между атмосферой и ионосферой, которые сопровождаются мощным радио излучением. Эти световые явления, такие, как спрайты, эльфы, голубые струи, наблюдаются, в том числе и группой ученых НИИЯФ МГУ, как в присутствии грозовых облаков, так и в безоблачных районах (Садовничий и др., 2011, Панасюк и др., 2016). Развиваясь в течение миллисекунд такие события могут захватить области размерами в сотни километров, или, альтернативно, могут образовать серию вспышек простирающихся вдоль меридиана на тысячи километров от районов гроз. Известно также, что сопровождающее грозовые разряды электромагнитное излучение, проникая на магнитную оболочку, может инициировать высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли (Восс и др., 1998; Гемелос и др., 2009), тем самым создавая предпосылки, в виде каналов ионизации, для нового грозового разряда, и новой инжекции высокоэнергичных частиц в этот лавинообразный процесс. Эффективность такой инжекции, и время жизни на магнитной оболочке таких электронов, пока плохо определены. Поэтому, только комплексное изучение частиц высокой энергии, галактических и солнечных космических лучей, частиц высыпающихся из радиационных поясов и проникающих в атмосферу, а также и собственно процесса развития электрического разряда, в частности молний, могут помочь найти ответ на вопросы о механизмах грозового разряда и ускорения частиц до релятивистских энергий в процессе этого разряда, что на сегодня представляется очень важной, актуальной научной задачей.

Комплекс для исследования высокоэнергичных излучений электромагнитных разрядов

Измерительный комплекс минимальной конфигурации должен включать в себя трековый детектор гаммаизлучения и нейтронов, а также содержать детектор радиоволн диапазона частот генерируемых электронами в грозовых разрядах, равно как и детектор световых вспышек. Подобная аппаратура длительное время разрабатывалась и успешно применялась как в наземных мониторных наблюдениях, так и в спутниковых экспериментах на борту на борту спутников МГУ «Татьяна - Университетский», «Татьяна-2», академического микро-спутника «Чибис, а также спутника «Вернов». Предполагается, что использовавшаяся в этих экспериментах аппаратура будет дополнена современной разработкой НИИЯФ МГУ получившей условное название модульный монитор нейтрального излучения (ММНИ), основанной на использовании кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ) и новейших типов матриц КФЭУ, сцинтилляторов Ce:GAGG и волокон из пластмассового сцинтиллятора, скомпонованных в трековый спектрометр, позволяющий определять энергию и направление регистрируемых гамма-квантов в диапазоне энергий от 10 кэВ до нескольких МэВ, и для нейтронов в диапазоне энергий от 1 до 100 МэВ. Возможность регистрации частиц различного типа определяется формируемым программой электронным триггером. Принцип регистрации гамма-квантов определяется комптоновскими взаимодействиями фотонов, а регистрация быстрых нейтронов осуществляется в режиме упругого рассеяния нейтронов на ядрах водорода в составе сцинтилляционного волокна. Общий вил подобного прибора представлен на рис. 1. В верхней части располагается годоскопический узел, представляющий собой сборку сцинтилляционных волокон, просматриваемых матрицами КФЭУ. Малая толщина волокна (1.5 мм) обеспечивает высокое пространственное разрешение при регистрации гамма-квантов и нейтронов. В нижней части должен находиться калориметрический узел, состоящий из набора сцинтилляционных детекторов Ce:GAGG размером 10х10х30 мм, предназначенный для регистрации гамма-квантов, рассеянных в годоскопе. Толщина этих детекторов позволяет с высокой эффективностью регистрировать гамма-кванты с энергиями вплоть до нескольких МэВ, при этом достигается энергетическое разрешение ~4% на энергии 1 МэВ. На рис. 1 приведена зависимость эффективности регистрации нейтронов годоскопическим узлом ММНИ. Видно, что более или менее значимый уровень регистрации обеспечивается при энергетическом пороге ~10 МэВ.



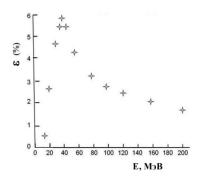


Рисунок 1. Слева – общий вид прибора ММНИ, **справа** – зависимость эффективности регистрации нейтронов от их энергии с помощью годоскопического узла из 24 слоев сцинтияялционных волокон толщиной 1.5 мм.

Помимо прибора ММНИ в комплект аппаратуры для изучения высокоэнергичных излучений электромагнитных разрядов должен входить: мобильный измерительный комплекс (МИК) в составе детектора ультрафиолетового и инфракрасного излучений (ДУФ), детектора молний LD350, GPS приемников LTS-3, измерителя электрического поля EFM-100, персонального компьютера с портами интерфейса USB. Все детекторы и компьютер гальванически развязаны с помощью оптического волокна, что обеспечивает высокую устойчивость наблюдения в условиях сильных полей грозовых разрядов.

Прибор ДУФ полностью аналогичен тем, которые использовались в космических экспериментах. Он включает два ФЭУ, входные окна которых закрыты специальными фильтрами, которые обеспечивают чувствительность в диапазонах ультрафиолетового (240 – 400 нм) и красного (610 – 800 нм) излучения. Сигналы с ФЭУ поступают на два входа 4-х канального аналогового мультиплексора и далее – на аналогоцифровой преобразователь, динамический диапазон которого составляет ~ 103, а тактовая частота может изменяться в зависимости от решаемой задачи от 1 мГц до ~ 10кГц. Цифровой код с АЦП поступает в логический блок, содержащий программируемые элементы, на которых организована система отбора событий, и оперативную память. Там же находится система управления работой детектора и система связи с компьютером. Коэффициент усиления ФЭУ определяется высоким напряжением на его делителях, которое управляется сигналом, отвечающим средней величине (за 1 с) анодного тока открытого ФЭУ.

Детектор молний ВОСТЕК LD-350 - прибор, позволяющий регистрировать молниевые разряды на достаточно большом расстоянии от приёмника по радио излучению в диапазоне длинных волн (50 – 500 кГц), определять направление распространения разрядов (облако - облако, облако - Земля), а также тип разряда: положительный или отрицательный. Принцип работы детектора основан на использовании определённого алгоритма, с помощью которого определяется местоположение разряда на основе определения интенсивности сигнала и направления магнитного поля, генерируемого при ударах молний. Сам прибор состоит из основного модуля, в котором установлена вся необходимая электроника, приёмной антенны, GPS приёмника. Время выхода на рабочий режим составляет в примерно 30 минут. За это время прибор определяет свои координаты по GPS, синхронизируется с UTC временем. Обычное количество "видимых спутников" равно восьми - десяти. Визуализация координат и типа молний в реальном времени осуществляется с помощью программы NexStorm поставляемой вместе с прибором

Прибор Boltek EFM-100 служит для измерения изменения электростатической компоненты электромагнитного поля как во время грозы, так и за небольшое время до начала первых вспышек молний. На верхней крышке установлена мельница, которая вращается посредством электро-моторчика. Данная мельница имеет некоторое количество лепестков, равноудалённых друг от друга. Под лепестками мельницы находятся чувствительные пластинки, которые то открываются, то закрываются из-за вращения мельницы. Когда чувствительные пластины подвергаются воздействию электрического поля (в тот момент, когда они открыты), заряд с земли проходит через резистор, установленный внутри прибора, и попадает на пластинки. Как только они закрыты, заряд с пластинок стекает обратно в землю через тот же резистор. Напряжение, которое фиксирует прибор, получается из напряжения переменного тока, проходящего через резистор. Это напряжение пропорционально напряжению, приложенному к чувствительным пластинкам. В комплекте вместе с прибором также имеется набор резисторов, которые устанавливаются внутри корпуса прибора. В зависимости от номинала резистора, изменяется и максимальный порог измеряемого поля. Сейчас установлен резистор, позволяющий измерять поля до ±20 кВ/м с разрешением не хуже 0,01 кВ/м.

Проведение наблюдений

Основная цель предлагаемого эксперимента - исследование высокоэнергичных электромагнитных разрядов и их возможной связи с высыпаниями магнитосферных электронов. Поскольку высыпание электронов, также как и распространение низкочастотных электромагнитных сигналов происходит преимущественно

вдоль силовых линий магнитного поля, принципиальным моментом в организации наблюдений является их одновременное проведение в разных точках, выстроенных вдоль магнитного меридиана. При этом предполагается использовать унифицированный комплекс аппаратуры в составе рассмотренных выше приборов ММНИ и МИК, которые должны устанавливаться на Земле и подниматься на высоты от нескольких до 20-30 км, для чего могут использоваться метеорологические зонды. На них предполагается устанавливать облегченный по весовым характеристикам прибор ММНИ (тип компоновки позволяет это сделать), прибор ДУФ, датчик электрического поля. Наземные наблюдения одновременно с запуском аппаратуры на метеорологических зондах могут проводиться, в частности, в Московской области, на высокогорной станции Арагац, геофизической обсерваториях Борок, Ярославская область и в г. Апатиты. В этом случае мы получим результаты применения нашего измерительного комплекса в грозовых и спокойных условиях минимум в трех-четырех различных точках с различным геомагнитным обрезанием в $R \approx 2.4~\Gamma B$ (г. Москва), $R \approx 3.6~\Gamma B$ (Арагац), $R \approx 2.1~\Gamma B$ (Борок), $R \approx 0.6~\Gamma B$ (Апатиты), а также и с различным уровнем возможного антропогенного влияния на поведение высыпающихся частиц. Отметим важность измерений в полярной области, поскольку именно там можно ожидать максимального воздействия высыпающихся электронов на электромагнитные процессы в атмосфере.

Ожидаемые результаты

В результате предлагаемых наблюдений предполагается ответить на ряд вопросов о механизмах и месте образования частиц высокой энергии по отношению к грозовой области и по отношению к месту электрического разряда в системе грозовых облаков, систематизировать измерения параметров окружающей среды во время регистрации частиц высокой энергии. Комплексные исследования с применением рассмотренного выше много-инструментального комплекса аппаратуры помогут разобраться с неопределенной ситуацией с опубликованными случаями регистрации нейтронов в совпадении с грозовой активностью, которая на сегодня еще ожидает своего решения. Такие вопросы, как: где, в каких процессах и с какими энергиями образуются нейтроны при грозовых разрядах, являются очень актуальной проблемой. Более совершенная аппаратура и новые корреляционные измерения нейтронов в различной грозовой, и в не грозовой обстановке, необходимы чтобы прояснить ситуацию с генерацией нейтронов непосредственно в грозовых разрядах, или высокоэнергичными гамма-квантами в фотоядерных реакциях в транзиентных событиях типа ТСГ. Изучение молний имеет наряду также и чисто практический интерес, поскольку молнии являются одним из самых разрушительных явлений природы, поэтому предупреждение о приближении грозовых разрядов является эффективным средством защиты от поражения молниями, и сопровождающими грозовые разряды различными корпускулярными и электромагнитными излучениями, которые могут повлиять на работу транспортных средств и объектов инфраструктуры на суше, в воздухе и на море.

Литература

- 1. Voss, H.D.; Walt, M.; Imhof, W.L.; Mobilia, J.; Inan, U. Satellite observations of lightning-induced electron precipitation, JGR, 1998, v. 103, Issue A6, p. 11725-11744.
- 2. Gemelos, E.S.; Inan, U.S.; Walt, M.; Parrot, M.; Sauvaud, J.A. Seasonal dependence of energetic electron precipitation: Evidence for a global role of lightning, Geoph.RL, 2009, V. 36, Issue 21, ID L21107
- 3. 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.
- 4. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзиентые энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч.П. Первые результаты // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 5, С. 369-376.
- 5. Roussel-Dupre R., Gurevich A.V. On runaway breakdown and upward propagating discharges, JGR, 1996, v. 101, A2, p. 2297.
- 6. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др. Исследование космической среды на микроспутниках «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2», Астрономический вестник. 2011. Т. 45. №. 1. С. 5–31.
- 7. Siingh D., Singh R., Kumar S. et al., Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere, JASTP, 2015, v. 134, p.78.

КИНЕТИКА МЕТАСТАБИЛЬНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА НА ВЫСОТАХ ВЕРХНИХ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

А.С. Кириллов¹, Р. Вернер², В. Гинева²

Аннотация. Молекулярный азот является основной составляющей атмосфер Земли, Титана, Тритона, Плутона. При взаимодействии солнечных фотонов, высокоэнергичных электронов и протонов, фотоэлектронов с атмосферами указанных планет значительная доля вносимой энергии трансформируется в энергию электронного возбуждения молекул N_2 . В рамках квантово-химических приближений проведен расчет скоростей гашения электронно-возбужденного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ при неупругих взаимодействиях с молекулами N_2 , СО, входящими в состав атмосфер планет Солнечной системы. Показана важная роль межмолекулярных процессов переноса электронного возбуждения при столкновениях молекул азота и угарного газа в атмосфере Титана (спутника Сатурна) при прохождении потоков фотоэлектронов через атмосферу.

Abstract. Molecular nitrogen is the main component in the atmospheres of Earth, Titan, Triton, Pluto. Significant part of the energy of solar photons, high-energetic electrons and protons, photoelectrons transforms in the energy of electronic excitation of N_2 molecules in interactions with the atmospheres. Applying quantum-chemical approximations we have calculated the quenching rates of electronically excited nitrogen $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ in the inelastic interactions with N_2 and CO molecules presenting in the atmospheres of planets of Solar system. It is shown that intermolecular processes of electron energy transfers play important role in the interaction of molecules of nitrogen and carbon monoxide in the atmosphere of Titan (Saturn satellite) during a penetration of photoelectron fluxes in the atmosphere.

Введение

Молекулярный азот является основной составляющей атмосфер Земли, Титана, Тритона, Плутона. Взаимодействие высокоэнергичных магнитосферных частиц, солнечных ультрафиолетовых фотонов, космических лучей с атмосферными газами с последующей ионизацией приводит к образованию потоков вторичных электронов в атмосферах планет [Campbell and Brunger, 2016]. Образованные вторичные электроны обладают достаточной энергией, чтобы возбуждать молекулы азота N_2 в различные триплетные состояния во время неупругих взаимодействий:

$$e + N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu = 0) \to N_2(A^3\Sigma_u^+, B^3\Pi_g, W^3\Delta_u, B^{\prime 3}\Sigma_u^-, C^3\Pi_u, \nu \ge 0) + e$$
 (1)

Излучение полос By-Бенеша (Wu-Benesch), послесвечения (Afterglow), второй положительной системы (2PG) и первой положительной системы (1PG) при спонтанных излучательных переходах

$$N_2(W^3\Delta_u, \nu) \to N_2(B^3\Pi_g, \nu') + h\nu_{WB}$$
 (2a)

$$N_2(B^{\prime 3}\Sigma_u^{-}, \nu) \rightarrow N_2(B^{3}\Pi_g, \nu') + h\nu_{AG}$$

$$\tag{26}$$

$$N_2(C^3\Pi_u,\nu) \to N_2(B^3\Pi_g,\nu') + h\nu_{2PG} \tag{2B}$$

$$N_2(B^3\Pi_g, \nu') \to N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu'') + h\nu_{1PG}$$
 (3)

ведет к тому, что энергия электронного возбуждения в конечном итоге аккумулируется на колебательных уровнях нижнего триплетного состояния $A^3\Sigma_{\rm u}^{\ +}$. Коэффициенты Эйнштейна для дипольно-разрешенных переходов (2а-в,3) имеют высокие значения [Gilmore et al., 1992], поэтому излучение полос молекулярного азота эффективно на высотах верхних атмосфер планет, где N_2 присутствует в достаточных количествах.

Если сравнивать время жизни состояния $A^3\Sigma_u^+$ с временами жизни остальных четырех триплетных состояний, то оно имеет достаточно большое значение (\sim 1 s) [Gilmore et al., 1992], поэтому столкновительные процессы играют решающую роль в населенностях уровней $A^3\Sigma_u^+$ состояния уже при давлениях больше \sim 10⁻³ Па. Таким образом, кинетические исследования $A^3\Sigma_u^+$ состояния должны учитывать и межмолекулярные, и внутримолекулярные процессы переноса энергии возбуждения, связанные с данным состоянием.

Исследования кинетики триплетных состояний молекулярного азота в верхних атмосферах планет, где N_2 является доминирующим газом, проводились в [Bhardwaj and Jain, 2012; Campbell et al., 2007, 2010; Cartwright, 1978; De La Haye et al., 2008; Jain and Bhardwaj, 2015; Kirillov, 2008, 2010; Lavvas et al., 2015; Morrill and Benesch, 1996]. Более того, было показано, что метастабильная молекула азота играет существенную роль в колебательной кинетике N_2 [Aladjev and Kirillov, 1995; Campbell et al., 2006; Lavvas et

¹ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

 $^{^2}$ Институт космических исследований и технологий БАН, г. Стара 3агора, Болгария

al., 2015]. Значительная часть энергии электронного возбуждения метастабильного азота может перейти в энергию колебаний N_2 при столкновительных и излучательных процессах. В дальнейшем эта колебательная энергия может трансформироваться в ИК-излучение атмосферы или в тепловую энергию.

Недавно в работе [Kirillov, 2016] с помощью приближений Ландау-Зинера и Розена-Зинера были проведены расчеты констант гашения $N_2(A^3\Sigma_u^+,\nu=0\text{-}10)$ при неупругих столкновениях с невозбужденными молекулами $CO(X^1\Sigma^+)$ и $N_2(X^1\Sigma_g^+)$ при комнатной температуре. Данные расчеты учитывали только межмолекулярные процессы переноса энергии с изначально возбужденной молекулы на невозбужденные, при этом молекулымишени CO и N_2 переходили в $a^3\Pi$ и $A^3\Sigma_u^+$ состояния, соответственно.

Основной целью настоящей работы является моделирование колебательных населенностей молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ и $CO(a^3\Pi)$ в атмосфере с доминированием N_2 -газа с добавкой CH_4 и CO (атмосфера Титана). Особое внимание уделено исследованию кинетических процессов, связанных с триплетными состояниями азота, и их роли в $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ и $CO(a^3\Pi)$ колебательных населенностях.

Константы гашения

Здесь мы рассматриваем вклад межмолекулярных

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu=0-23) + CO(X^1\Sigma_v^+, \nu=0) \to N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu''\ge 0) + CO(a^3\Pi, \nu')$$
 (4)

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu=2-23) + N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu=0) \to N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu'' \ge 0) + N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu')$$
(5)

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu=7-23) + N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu=0) \to N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu''\ge 0) + N_2(B^3\Pi_g, \nu')$$
(6a)

и внутримолекулярных

$$N_{2}(A^{3}\Sigma_{u}^{+},\nu=7-23) + N_{2}(X^{1}\Sigma_{g}^{+},\nu=0) \rightarrow N_{2}(B^{3}\Pi_{g},\nu') + N_{2}(X^{1}\Sigma_{g}^{+},\nu=0)$$

$$(66)$$

процессов переноса энергии электронного возбуждения при столкновениях метастабильного азота с невозбужденными молекулами СО и N_2 . Рассчитанные согласно результатам [Kirillov, 2016] константы процессов (4,5,6 а,б) представлены на рис. 1. Что касается гашения нижних колебательных уровней метастабильного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+,\nu=0,1)$ при столкновениях с молекулами N_2 , то предлагается рассматривать его как внутримолекулярный резонансный по энергии переход на $X^1\Sigma_g^+$ состояние [Kirillov, 2012]

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu=0, 1) + N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu=0) \to N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu'=25, 26) + N_2(X^1\Sigma_g^+, \nu=0).$$
(7)

Значения $k_7(v=0)=3.7\times10^{-16}$ и $k_7(v=1)=3.4\times10^{-16}$ см³с⁻¹ берутся согласно экспериментальным значениям из [Dreyer and Perner, 1973].

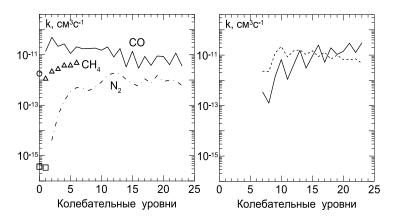


Рисунок 1. Рассчитанные константы процессов (4) и (5) — слева сплошная и штрих-пунктирная линии, процессов (6а) и (6б) — справа пунктирная и сплошная линии; экспериментальные данные для процессов (7), (8) и (4) при ν =0 — квадраты, треугольники и кружочек, соответственно.

Результаты расчетов констант для процесса (4) в [Kirillov, 2016] показали значительное расхождение с экспериментальными значениями для колебательного уровня v=0. Поэтому мы здесь используем значение $k_4(v$ =0)=1.8×10⁻¹² см³с⁻¹, взятое из работ [Dreyer et al., 1974; Thomas et al., 1987], но с квантовыми выходами $f_4(v$ =0 $\rightarrow v'$ =0)/ $f_4(v$ =0 $\rightarrow v'$ =1) \approx 5:1 в соответствии с теоретическими оценками, полученными в работе [Kirillov, 2016]. Данное значение $k_4(v$ =0) также приведено на рис. 1.

Поскольку метан является одним из главных компонентов атмосферы Титана, то его взаимодействие с метастабильным азотом необходимо учесть. Константы процесса взаимодействия

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu=1-6) + CH_4 \rightarrow products$$
 (8)

согласно [Golde et al., 1989; Herron, 1999] приведены на рис. 1. Квантово-химические расчеты в [Sharipov et al., 2016] были выполнены для исследования процесса (8). Авторы показали, что реакция $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ с метаном CH_4 может приводить к гашению метастабильного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ с диссоциацией молекулы метана и образованием H и CH_3 .

Колебательные населенности $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ и $CO(a^3\Pi)$ в атмосфере Титана

Аналогично процессу (1) потоки высокоэнергичных электронов при столкновениях с молекулами угарного газа приводят к возбуждению электронных оболочек СО. Рассмотрим здесь процессы возбуждения нижайшего по энергии триплетного состояния СО фотоэлектронами в атмосфере Титана:

$$e + CO(X^{1}\Sigma^{+}, \nu=0) \rightarrow CO(a^{3}\Pi, \nu\geq 0) + e \tag{9}$$

В настоящей работе мы используем потоки фотоэлектронов в атмосфере Титана согласно [Campbell et al., 2010] для того, чтобы рассчитать скорости процессов (1) и (9). Поперечные сечения возбуждения триплетных состояний N_2 и CO при столкновении с электронами берутся согласно Itikawa [2006, 2015].

Результаты расчета концентраций $N_2(A^3\Sigma_u^+,v=0-15)$ на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана показаны на рис. 2. При расчете были использованы все константы процессов, представленные на рис. 1. Концентрации молекулярного азота в атмосфере Титана брались согласно [Fulchignoni et al., 2005; Lavvas et al., 2015]. Кроме того, полагалось, что $[CH_4]=0.03\cdot[N_2]$ и $[CO]=3.2\cdot10^{-5}\cdot[N_2]$ [Lopez-Valverde et al., 2005]. На рис. 2 также показаны вклады:

- 1) прямого возбуждения состояния $A^3\Sigma_u^+$ фотоэлектронами при столкновениях (1),
- 2) возбуждения триплетных состояний $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$ при столкновениях (1) и каскадных переходов (2 а-в, 3).

Как видно из рис. 2, для нижних колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ определяющими в накачке являются каскадные процессы с вышележащих триплетных состояний. С ростом колебательного номера прямое возбуждение $A^3\Sigma_u^+$ фотоэлектронами становится доминирующим и вкладом других триплетных состояний можно пренебречь.

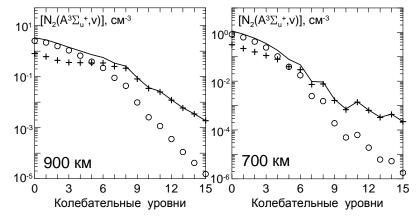


Рисунок 2. Рассчитанные колебательные населенности $N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu=0.15)$ на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана (сплошные линии). Вклады прямого возбуждения $A^3\Sigma_u^+$ состояния фотоэлектронами и каскадных процессов с других триплетных состояний – крестики и кружочки, соответственно.

Аналогично результаты расчета концентраций $CO(a^3\Pi, v=0-10)$ на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана представлены на рис. 3. Расчет проводился для двух случаев:

- 1) возбуждение триплетных состояний молекулярного азота фотоэлектронами (процесс (1)), перенос энергии возбуждения с триплетных состояний на состояние $A^3\Sigma_{\rm u}^+$ при спонтанных излучательных переходах (8а-в,9), возбуждение триплетного состояния СО при межмолекулярном процессе переноса энергии (4);
- 2) прямое возбуждение состояния а³П монооксида углерода фотоэлектронами (процесс (9)).

Как видно из рис.3, вклад межмолекулярного процесса переноса электронного возбуждения (4) в накачку $a^3\Pi$ состояния CO для колебательных уровней ν =0-4 является определяющим на высоте 700 км ([N₂]=2.5·10¹² см⁻³). На высоте 900 км ([N₂]=0.8·10¹¹ см⁻³) относительный вклад межмолекулярного процесса (4) значительно уменьшается, а с дальнейшим ростом высоты и уменьшением плотности атмосферы им можно пренебречь при сравнении с процессом возбуждения CO($a^3\Pi$) фотоэлектронами (9).

Заключение

Проведены расчеты колебательных населенностей молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu=0-15)$ и $CO(a^3\Pi, \nu=0-10)$ в атмосфере с доминированием N_2 -газа и добавкой CH_4 и CO (атмосфера Титана) при концентрациях молекулярного азота $[N_2]=10^{11}-10^{13}\,$ см $^{-3}$ и $[CH_4]=0.03\cdot[N_2],$ $[CO]=3.2\cdot10^{-5}\cdot[N_2].$ Расчеты учитывали возбуждение триплетных

состояний N_2 и CO потоками фотоэлектронов (процессы (1) и (9)), излучательные переходы между триплетными состояниями молекулярного азота (процессы (2а-в) и (3)), межмолекулярные и внутримолекулярные процессы переноса энергии (процессы (4), (5), (6а,б), (7)) и диссоциацию молекул метана при столкновении с молекулами метастабильного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ (процесс (8)).

Основные результаты работы состоят в следующем:

- 1. Показано, что для нижних колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ определяющими в накачке являются каскадные процессы с вышележащих триплетных состояний за счет процессов (2а-в,3). С ростом колебательного номера прямое возбуждение $A^3\Sigma_u^+$ фотоэлектронами (процесс (1)) становится доминирующим, а вкладом других триплетных состояний можно пренебречь.
- 2. Впервые показано, что вклад межмолекулярного процесса переноса электронного возбуждения (4) в накачку $a^3\Pi$ состояния CO для нижних колебательных уровней является определяющим на высотах меньше 900 км ([N₂]=0.8·10¹¹ см⁻³). На высотах выше 900 км относительный вклад межмолекулярного процесса (4) значительно уменьшается, а с дальнейшим ростом высоты и уменьшением плотности атмосферы им можно пренебречь при сравнении с процессом возбуждения $CO(a^3\Pi)$ фотоэлектронами (9).

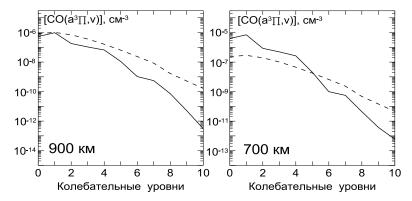


Рисунок 3. Рассчитанные концентрации $CO(a^3\Pi, \nu)$ на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана: за счет процесса (4) (сплошные линии) и за счет прямого возбуждения фотоэлектронами (9) (пунктиры).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №7.

Литература

- 1. Aladjev G.A. and Kirillov A.S., 1995, Adv. Space Res., v.16, p.109-112.
- 2. Bhardwaj A. and Jain S.K., 2012, Icarus, v.218, p.989-1005.
- 3. Campbell L. and Brunger M.J., 2016, Inter. Rev. Phys. Chem., v.35, p.297-351.
- 4. Campbell L., Cartwright D.C., Brunger M.J., Teubner P.J.O., 2006, J. Geophys. Res., v.111, A09317, doi: 10.1029/2005JA011292.
- 5. Campbell L., Cartwright D.C., Brunger M.J., 2007, J. Geophys. Res., v.112, A08303, doi: 10.1029/2007JA012337.
- Campbell L., Kato H., Brunger M.J., Bradshaw M.D., 2010, J. Geophys. Res., v.115, A09320, doi: 10.1029/2010JA015482.
- 7. Cartwright D.C., 1978, J. Geophys. Res., v.83, p.517-531.
- 8. De La Haye V., Waite J.H., Jr., Cravens T.E., Bougher S.W., Robertson I.P., Bell J.M., 2008, J. Geophys. Res., v.113, A11314, doi: 10.1029/2008JA013078.
- 9. Dreyer J.W., Perner D., Roy C.R., 1974, J. Chem. Phys., v.61, p.3164-3169.
- 10. Fulchignoni M. Et al., 2005, Nature, v.438, p.785-791.
- 11. Gilmore F.R., Laher R.R., Espy P.J., 1992, J. Phys. Chem. Ref. Data, v.21, p.1005-1107.
- 12. Itikawa Y., 2006, J. Phys. Chem. Ref. Data, v.35, p.31-53.
- 13. Itikawa Y., 2015, J. Phys. Chem. Ref. Data, v.44, 013105, doi:10.1063/1.4913926.
- 14. Jain S.K. and Bhardwaj A., 2015, Icarus, v.246, p.285-290.
- 15. Kirillov A.S., 2008, Ann. Geophys., v.26, p.1159-1169.
- 16. Kirillov A.S., 2010, Ann. Geophys., v.28, p.181-192.
- 17. Kirillov A.S., 2012, J. Atm. Sol. Terr. Phys., v.81-82, p.9-19.
- 18. Kirillov A.S., 2016, Chem. Phys. Lett., v.643, p.131-136.
- 19. Morrill J.S. and Benesch W.M., 1996, J. Geophys. Res., v.101, p.261-274.
- 20. Sharipov A.S., Loukhovitski B.I., Starik A.M., 2016, J. Phys. Chem. A, v.120, p.4349-4359.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ ИОНОСФЕРНОГО ОНЧ ИСТОЧНИКА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО НАГРЕВУ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ КВ СИГНАЛОМ

О.М. Лебедь, С.В. Пильгаев, А.В. Ларченко, М.В. Филатов, А.С. Никитенко, Ю.В. Федоренко

Полярный геофизический институт, Anamumы, Poccuя, e-mail: olgamihsh@yandex.ru

Аннотация В данной работе приведены результаты наземных наблюдений электромагнитного поля на станциях ПГИ во время сеансов нагрева ионосферы мощным модулированным КВ сигналом в октябре 2014 г. С помощью полно-волнового метода проведено моделирование пространственного распределения компонент электромагнитного поля ионосферного ОНЧ источника у земной поверхности. Обсуждаются особенности возбуждения волновода Земля-ионосфера и распространения ОНЧ сигнала. Сравниваются результаты оценок фазовой скорости сигнала ионосферного ОНЧ источника, полученных с помощью наземных наблюдений и моделирования. Найдены профили электронной концентрации, при которых возможно получение фазовых скоростей, близких к измеренным в эксперименте.

Abstract. The results of ground-based observations of ELF/VLF emissions during heating experiments in October 2014 are described. The spatial behavior of electromagnetic field of the ionospheric VLF source near ground is modeled using full-wave method. The features of excitation of the Earth-ionosphere waveguide and propagation of VLF signal are discussed. The phase velocity estimates of the ionospheric VLF source obtained by ground-based observations and the results of modeling are compared. The electron density profiles corresponding to phase velocities close to the measured in the experiment are found.

Введение

Эксперименты по нагреву высокоширотной ионосферы мощным модулированным коротковолновым (КВ) сигналом позволяют исследовать физические процессы, происходящие в ионосферной плазме, и эффекты распространения низкочастотных (НЧ) волн в волноводе Земля-ионосфера. Результаты такого рода исследований могут быть использованы как для целей связи на низких частотах, так и для изучения глубинного распределения проводимости земной поверхности, что может дать сведения о ее геологической структуре.

Один из таких экспериментов проводился Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) с 17 по 26 октября 2014 г. с помощью комплекса «EISCAT/Heating», расположенного вблизи г. Тромсе (Норвегия, 69.58° с.ш., 19.21° в.д.) [1]. КВ излучение производилось в направлении магнитного зенита с частотами модуляции 1017, 2017 и 3017 Гц. Это воздействие вызвало модуляцию проводимости нижней ионосферы и образование низкочастотного ионосферного источника. На частотах выше частоты поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера (1.8-2.0 кГц) в волноводе могут распространяться несколько волноводных мод, обладающих разными групповыми и фазовыми скоростями и разным затуханием, а на частоте 1 кГц – только ТЕМ мода. Во время сеансов нагрева ионосферы велись синхронизированные наземные наблюдения электромагнитного поля ионосферного ОНЧ источника на станциях Полярного геофизического института: «Ловозеро» (67.97° с.ш., 35.02° в.д.), «Апатиты» (67.58° с.ш., 33.31° в.д.), «Верхнетуломский» (68.6° с.ш., 31.79° в.д.) и «Баренцбург» (78.06° с.ш., 14.22° в.д.). Системы сбора данных, установленные на станциях, обеспечивают высокую точность синхронизации времени регистраторов с допустимой ошибкой не более нескольких микросекунд. Это дает возможность проведения высокоточных измерений фаз компонент электромагнитного поля и, соответственно, фазовых и групповых скоростей распространения НЧ волн. Расположение станций «Ловозеро» и «Баренцбург» таково, что трассы, проходящие через эти станции и стенд «EISCAT», практически перпендикулярны друг другу. В свою очередь, станции «Ловозеро» и «Верхнетуломский» расположены на одной линии со стендом «EISCAT». Такое расположение станций и такой выбор частот позволяет исследовать как процессы волноводного распространения НЧ сигналов, так и структуру ионосферного ОНЧ источника.

Данная работа посвящена исследованию эффектов распространения НЧ волн в волноводе Земля-ионосфера. В ней мы ограничились результатами наземных наблюдений электромагнитного поля на станциях «Ловозеро» и «Верхнетуломский» и на одной частоте — $1017~\Gamma$ ц. В ходе работы на основе измерений вертикальной электрической (E_z) и двух горизонтальных магнитных (H_x и H_y) компонент электромагнитного поля оценивались фазовые скорости распространения НЧ сигналов от ионосферного ОНЧ источника. Также проводилось моделирование пространственного распределения компонент электромагнитного поля ионосферного ОНЧ источника у земной поверхности с помощью полно-волнового метода [2, 3]. Это позволило исследовать процессы распространения от контролируемого ионосферного источника и найти

профили электронной концентрации, при которых возможно получение фазовых скоростей, близких к измеренным в эксперименте.

Результаты эксперимента

В результате эксперимента по нагреву высокоширотной ионосферы мощным модулированным КВ сигналом, проведенного в октябре 2014 г., были получены записи компонент электромагнитного поля. НЧ сигнал регистрировался для конкретной частоты модуляции в виде пятиминутных «посылок» с интервалом в 15 мин. Наиболее длинная запись была произведена 26 октября, эксперимент велся более двух часов подряд. На рис. 1 приведены огибающие трех основных компонент (E_z , H_x , H_y) по данным станций «Ловозеро» и «Верхнетуломский» на частоте 1017 Гц 26 октября 2014 г. Как видно из рисунка, компоненты между собой очень похожи. Это объясняется тем, что станции расположены практически на одной линии со стендом «EISCAT» и, следовательно, сигнал распространяется по одной трассе. Также наблюдается значительное преобладание H_x компоненты над компонентой H_y , что связано с взаимным расположением трассы и системы координат. Направление трассы практически совпадает с направлением оси Y.

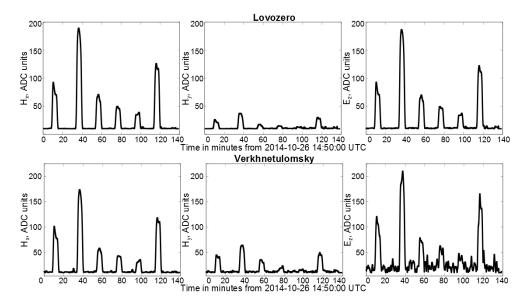


Рисунок 1. Огибающие компонент E_z , H_x и H_y по данным станций «Ловозеро» и «Верхнетуломский» на частоте 1017 Γ ц.

Высокая точность привязки отсчетов данных к мировому времени позволила произвести измерения абсолютных фаз НЧ сигналов на станциях «Ловозеро» и «Верхнетуломский». Знание абсолютной фазы может позволить оценить фазовый путь сигнала от источника и узнать высоту источника. Зависимости измеренных на станциях фаз НЧ сигнала от времени для компоненты E_z показаны на рис. 2 слева. Из рисунка видно, что в измеренных фазах присутствует тренд. Его возникновение можно было бы объяснить неправильной синхронизацией станций с мировым временем, но точность синхронизации многократно проверялась, в том числе по частотам СДВ передатчиков РСДН-20.

Для того чтобы оценить фазовую скорость распространения сигнала от ионосферного ОНЧ источника, мы удалили обнаруженный тренд и вычислили v_{ph} как

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k}$$
 $k = \frac{\Delta \varphi}{\Delta r}$ $\varphi(r) = \arg E_z(r)$

Зависимость фазовой скорости на трассе Верхнетуломский-Ловозеро от времени за 26 октября 2016 г. показана на рис. 2 справа. Как видно из рисунка, ее значения варьируются от 255 до 267 тыс. км/с. Наблюдаемые вариации, в принципе, могут быть вызваны изменениями условий распространения или возбуждения волновода Земля-ионосфера. Это может быть изменение высоты источника, изменение размеров источника или изменение профиля электронной концентрации ионосферы. Для разделения возможных причин наблюдаемых вариаций фазовой скорости на трассе необходимо привлечение модели

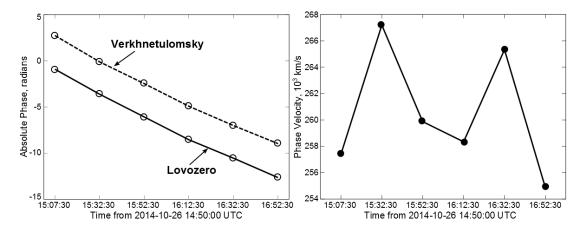


Рисунок 2. Слева - измеренные фазы компоненты E_z на частоте 1017 Γ ц в «Ловозеро» и «Верхнетуломский», **справа** — фазовая скорость на трассе Верхнетуломский-Ловозеро.

Моделирование эксперимента

Для моделирования эксперимента по нагреву ионосферы мощным КВ излучением, мы использовали полноволновой метод («full-wave method»), подробно описанный в работе [2]. Он позволяет вести расчет электромагнитного поля в плоскослоистой среде, которая представляет собой горизонтально стратифицированную намагниченную плазму с произвольным направлением магнитного поля и произвольной зависимостью электронной концентрации от высоты. Этот метод стабилен против неустойчивости, вызываемой затухающими волнами, и эффективно использует вычислительные ресурсы. Данный метод был реализован в вычислительной среде Octave. Для ускорения вычислений основные матричные операции были реализованы на языке C++ с использованием API C++ Octave. Распараллеливание велось при помощи пакета OpenMP.

Входные параметры модели задавались следующим образом. Профили электронной концентрации N_e в точке, соответствующей расположению станции «Ловозеро», были рассчитаны с использованием эмпирической модели IRI-2012 для времен эксперимента. Полученный набор профилей отражал изменение свойств ионосферы за это время. Высотный профиль частоты столкновений электронов v_e рассчитывался с помощью данных эмпирической модели NRLMSISE-00. Значение индукции магнитного поля вблизи поверхности Земли бралось по модели IGRF и составило для обс. Ловозеро 53 мкТл. Источник был представлен педерсоновским и холловским горизонтальными токами, текущими вдоль и поперек магнитного поля на высоте 80 км над земной поверхностью. Считается, что примерно на этой высоте располагается ионосферный ОНЧ источник, возникающий во время экспериментов по нагреву. Диаметр источника составлял 30 км.

Результаты моделирования

С помощью полно-волнового метода мы провели моделирование эксперимента по распространению электромагнитных волн от ионосферного ОНЧ источника. Рассчитав компоненты электромагнитного поля на расстояниях, соответствующих трассам EISCAT-Верхнетуломский и EISCAT-Ловозеро, мы оценили фазовую скорость, соответствующую фазовой скорости, измеренной экспериментально на трассе Верхнетуломский-Ловозеро. На частоте 1017 Γ ц на больших расстояниях от источника на распространение электромагнитного поля влияет только состояние волновода Земля-ионосфера. Ни высота, на которой расположен источник, ни его размеры (вплоть до диаметра в 130 км) не оказывают существенного влияния на фазовую скорость. При этом значения скорости, рассчитанные с помощью полно-волнового метода, оказались значительно выше измеренных экспериментально. Они варьируются от 279 до 282 тыс. км/с. Наиболее вероятной причиной этого может являться несоответствие профилей N_e , взятых с помощью модели IRI-2012, наблюдаемым в реальности во время эксперимента.

Для объяснения наблюдаемых вариаций фазовой скорости на трассе Верхнетуломский-Ловозеро мы попытались подобрать соответствующие профили электронной концентрации, при которых возможно получение фазовых скоростей, близких к измеренным в эксперименте. Для этого мы смещали профиль и оценивали для него фазовую скорость. На рис. 3 приведен результат такого подбора, пунктирными линиями показан исходный профиль N_e , взятый с помощью модели IRI-2012 для 15:00 UT. Показанные в нижней части рисунка профили электронной концентрации позволяют получить фазовые скорости, соответствующие экспериментальным. Как видно из рисунка, значения фазовой скорости, полученные в

эксперименте, наблюдаются при повышении концентрации электронов на высотах от 50 до 90 км примерно на порядок.

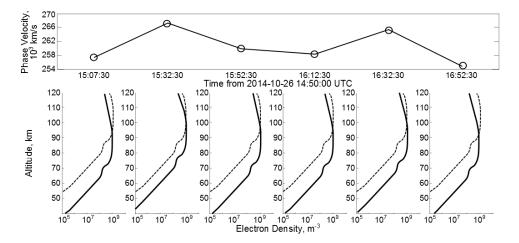


Рисунок 3. Фазовая скорость на трассе Верхнетуломский-Ловозеро (вверху) и соответствующие ей возможные профили электронной концентрации (внизу). Пунктир — профиль, взятый с помощью модели IRI-2012.

Выводы

Проведены измерения компонент электромагнитного поля на станциях ПГИ во время эксперимента по нагреву ионосферы мощным КВ излучением в октябре 2014 г. Обнаружены вариации фазовой скорости на трассе Верхнетуломский-Ловозеро 26 октября 2014 г., по-видимому, вызванные изменением условий распространения в волноводе Земля-ионосфера вдоль трассы за время эксперимента. Моделирование эксперимента полно-волновым методом показало, что на частоте 1017 Гц на больших расстояниях изменение высоты ионосферного источника не влияет на фазовую скорость распространения сигнала. С помощью полно-волнового метода найдены профили электронной концентрации, при которых возможно получение фазовых скоростей, близких к измеренным в эксперименте.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам обс. «Ловозеро», обс. «Баренцбург» и радиофизического полигона «Верхнетуломский» и лично Благовещенской Н. Ф. за помощь в проведении эксперимента и анализе результатов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00293.

- 1. В.Л. Фролов, Н.В. Бахметьева, В.В. Беликович [и др.] Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, No 7. С. 330–340.
- 2. 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.
- 3. Lehtinen N. G., Inan U. S. Full-wave modeling of transionospheric propagation of VLF waves // Geophys. Res. Lett., 36, L03104, 2009.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТОСФЕРЫ АРКТИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ

В.А. Любчич, В.Ф. Григорьев, И.И. Демченко

Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия

Аннотация. Работа посвящена применению электромагнитных методов для изучения геологического строения малодоступных арктических островов. В результате проведенных экспериментальных работ на архипелаге Шпицберген продемонстрирована принципиальная возможность применения мощного контролируемого источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного (ЭНЧ) диапазона, расположенного в северной части Кольского полуострова, для дистанционного электромагнитного зондирования (ЭМЗ) земной коры малодоступных островов в западной части Арктики. Однако в условиях низкоомного, мощного осадочного чехла глубинность таких исследований будет ограниченной. Существенно дополнить информацию о геоэлектрическом разрезе исследуемых участков можно с помощью комбинирования данных ЭМЗ с контролируемым источником и данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ). При этом результаты ЭМЗ могут служить в качестве реперных значений для выбора наименее искаженных кривых МТЗ. Привлечение данных МТЗ расширяет пригодный для интерпретации диапазон в области низких частот, что увеличивает глубинность геофизических исследований.

Abstract. The article deals with utilization of electromagnetic geophysical methods to study the geological structure of inaccessible Arctic islands. Possibility of applying the powerful transmitter of electromagnetic fields of extremely low frequency (ELF) range, located in the Northern part of the Kola Peninsula, for electromagnetic sounding of the Svalbard archipelago was demonstrated. Results of experimental works have shown the usefulness of applying remote electromagnetic methods to study the geological structure of inaccessible islands in the Western part of the Arctic. But the depth of such studies is limited in conditions of the low-resistance, thick sediment cover. The integrated interpretation of magnetotelluric (MTS) data and electromagnetic sounding with controlled source data can significantly amplify the information about the geoelectric section of investigated areas. Results of the electromagnetic sounding with controlled source are used as reference values for selecting least distorted MTS curves. The application of MTS data increases the depth of geophysical research.

Введение

В настоящее время изучение геологического строения районов Арктики является актуальной научной задачей в связи с развитием минерально-сырьевой базы экономики и поиска новых месторождений полезных ископаемых в данном регионе. Вследствие удаленности и малодоступности арктических островов представляет интерес возможность применения дистанционных электромагнитных методов для исследования их геологического строения в силу мобильности, экологичности и малозатратности производственных геофизических работ. В статье представлены результаты эксперимента по электромагнитному зондированию земной коры, проведенного сотрудниками Полярного геофизического института (ПГИ) на архипелаге Шпицберген. Целью эксперимента было изучение возможности использования искусственных и естественных электромагнитных полей для определения геоэлектрического разреза осадочного чехла, причем источник искусственного электромагнитного поля ЭНЧ-диапазона располагался в северной части Кольского полуострова. Выполненные экспериментальные работы фактически были первыми в деле применения наземных электромагнитных методов для изучения геоэлектрических свойств осадочного чехла архипелага Шпицберген.

Описание эксперимента и использованной аппаратуры

Измерения электромагнитного поля проводились в двух точках, первая из них располагалась на территории геофизической обсерватории ПГИ «Баренцбург», вторая – в районе структурной геологической скважины «Вассдаленская-2», в южной части земли Норденшельда. Применение современных измерителей электромагнитного поля, разработанных в ПГИ, позволило провести одновременно измерения как искусственных, так и естественных электромагнитных полей в широком диапазоне частот. Система сбора данных регистрирует сигналы трёх компонент магнитного поля и двух компонент горизонтального электрического поля. Полоса пропускания приёмника от 0,01 до 200 Гц. В основе системы регистрации и сбора информации лежит 22-битный аналого-цифровой преобразователь, частота дискретизации которого составляет 512 Гц [1]. Измеритель электромагнитного поля, представленный на рис. 1, включает в себя: блок регистрации с комплектом кабелей и распределительной коробкой, ноутбук с сетевым интерфейсным

кабелем, лафет для магнитных индукционных датчиков, магнитные индукционные датчики (два горизонтальных и один вертикальный), усилитель электрических антенн, комплект заземлителей электрических антенн, электрическая антенна (четыре луча по 50 метров для мобильного комплекта), антенна GPS с мачтой и фидером, короб, аккумулятор с зарядным устройством.





Рисунок 1. Измеритель электромагнитного поля

Рисунок 2. Экспериментальный образец генератора

В качестве искусственного источника электромагнитного поля использовался экспериментальный образец мощного стационарного источника электромагнитного излучения ЭНЧ-диапазона [2], который позволяет генерировать гармонические электромагнитные волны в диапазоне частот от 0,01 до 200 Гц. Дискретность установки частоты в диапазоне частот 0,01-10 Гц составляет 0.001 Гц, в диапазоне частот 10-40 Гц составляет 0.01 Гц. Номинальная мощность 160 кВт. Электропитание источника осуществляется от трехфазной сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц с линейным напряжением $380B \pm 10\%$ с гальванической развязкой от питающей сети. В состав генератора, представленного на рис. 2, входят следующие блоки: шкаф высоковольтного выпрямителя и инвертора (ВВИ), шкаф согласующего устройства продольной компенсации (СУ), повышающий трансформатор типа ТМПН-160/3-УХЛ1 со схемой соединения обмоток Д/Yн-11 (ПТ), шкаф устройств защиты и коммутации (УЗК), выносной пульт управления и индикации (ПУИ). Все блоки генератора расположены и закреплены в специальном фургоне (кунге) автомобиля ГАЗ-33081.

Электромагнитное поле в диапазоне частот от 3 Γ ц до 33 Γ ц излучалось антенной в виде горизонтального заземлённого электрического диполя длиной порядка 60 километров, расположенного в северной части Кольского полуострова и ориентированного в субширотном направлении. Действующая сила тока в антенне составляла порядка 65 - 80 A.

Результаты эксперимента

В силу особенностей геометрии эксперимента, то есть взаимного расположения и ориентации питающего диполя, измерительных линий и магнитных датчиков приемников, удалось надежно зарегистрировать одну из поляризаций искусственного электромагнитного поля, поэтому в данной работе анализировался только один элемент тензора импеданса $Z_{xy} = E_x / H_y$, где E_x и H_y – горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей соответственно. За ось X принято направление на север вдоль магнитного меридиана. По значениям модуля импеданса определялось кажущееся сопротивление ρ_k [3]. На рис. 3 представлены результаты измерений электромагнитного поля.

Как видно из рисунка, кривые МТЗ хорошо согласуются с данными электромагнитного зондирования с контролируемым источником. Интерпретация данных МТЗ проводилась в ограниченном диапазоне частот от 1 Гц до 100 Гц для точки «Баренцбург» и от 0,5 Гц до 100 Гц для точки «Вассдаленская-2». На более низких частотах наблюдались нисходящие ветви кривых МТЗ. Проведенные модельные расчеты показали, что нисходящие ветви обусловлены искажениями. Причины искажений могли быть различными. Возможно, сказывалась близость расположения естественных источников полей в полярных широтах. Искажения могли быть также вызваны неоднородностями в верхней части земной коры, в частности, наличием морских фьордов вблизи точек наблюдений.

Для построения геоэлектрического разреза верхней части осадочного чехла использовалась итерационная процедура Зоди [3]. Суть этой процедуры заключалась в разбиении нижнего полупространства на множество горизонтальных плоских слоев с заданными начальными значениями удельного сопротивления.

Эти начальные значения были определены по результатам алгебраической трансформации Молочного-Ле Вьета кривой кажущегося сопротивления ρ_k в график зависимости действующего сопротивления ρ' от действующей глубины z'. В процессе итерационной процедуры Зоди значения удельного сопротивления слоев подбирались таким образом, чтобы экспериментальная кривая кажущегося сопротивления совпадала с теоретической кривой, рассчитанной для данной горизонтально-слоистой модели земной коры. На рис. 4 представлены результаты интерпретации данных МТЗ и модели геоэлектрического разреза верхней части осадочного чехла для точек «Баренцбург» и «Вассдаленская-2». Для сравнения приведены фрагменты литологических колонок структурных скважин «Грумантская-1» и «Вассдаленская-2» [4].

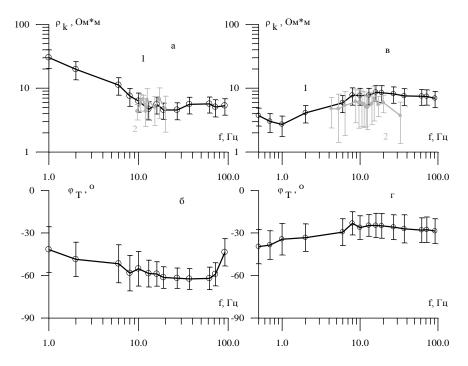


Рисунок 3. Результаты измерений электромагнитного поля: **a** – значения кажущегося сопротивления ρ_k в точке «Баренцбург» (1 – кривая по данным МТЗ, 2 - значения по результатам ЭМЗ с контролируемым источником); **6** – значения фазы ϕ_T элемента тензора импеданса Z_{xy} ; **в** – значения кажущегося сопротивления ρ_k в точке «Вассдаленская-2»; **г** – значения фазы ϕ_T элемента тензора импеданса Z_{xy} .

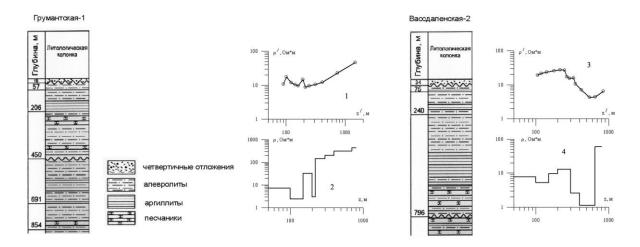


Рисунок 4. Результаты интерпретации данных МТЗ и фрагменты литологических колонок структурных скважин «Грумантская-1» и «Вассдаленская-2»: 1 – график зависимости действующего сопротивления ρ' от действующей глубины z'; 2 – модель геоэлектрического разреза верхней части осадочного чехла, полученная по результатам интерпретации данных МТЗ, измеренных в точке «Баренцбург»; 3 – график зависимости действующего сопротивления ρ' от действующей глубины z'; 4 – модель геоэлектрического разреза верхней части осадочного чехла, полученная по результатам интерпретации данных МТЗ, измеренных в точке «Вассдаленская-2».

Полученные модели геоэлектрического разреза хорошо согласуются с данными бурения. Осадочные породы верхней части чехла представлены маломощными четвертичными отложениями и перемежающимися слоями алевролитов, аргиллитов и песчаников кайнозойской эры, причем удельное сопротивление аргиллитов по данным каротажа сопротивления разведочных скважин треста «Арктикуголь» ниже сопротивления алевролитов и песчаников. Из литологической колонки скважины «Грумантская-1», расположенной в северной части земли Норденшельда в 20 км к востоку от точки наблюдений «Баренцбург», проводящий слой аргиллитов отмечается на глубинах 100 – 200 метров, что хорошо согласуется с моделью, представленной на рис. 4, график 2. Заслуживает также внимания узкий слой с высокой электропроводностью на глубине порядка 200 метров. Этот слой может соответствовать горизонтальному угольному пласту, залегающему приблизительно на таких же глубинах в районе обсерватории ПГИ «Баренцбург». В южной части земли Норденшельда проводящий слой аргиллитов, как видно из литологической колонки скважины «Вассдаленская-2», имеет большую мощность и залегает глубже, на глубинах порядка 500 – 650 метров, что соответствует модели геоэлектрического разреза верхней части осадочного чехла, представленной на рис. 4, график 4.

Выводы

Полученные результаты экспериментальных работ продемонстрировали возможность использования дистанционных электромагнитных зондирований земной коры малодоступных арктических островов с помощью удаленного мощного контролируемого источника поля ЭНЧ-диапазона. Однако в условиях низкоомного, мощного осадочного чехла глубинность таких исследований будет ограниченной.

Существенно дополнить информацию о геоэлектрическом разрезе исследуемых участков можно с помощью комбинирования данных ЭМЗ с контролируемым источником и данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ). При этом результаты ЭМЗ могут служить в качестве реперных значений для выбора наименее искаженных кривых МТЗ. Привлечение данных МТЗ расширяет пригодный для интерпретации диапазон в области низких частот, что увеличивает глубинность геофизических исследований.

- 1. Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента, 2011, № 3, С. 73-75.
- 2. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Селиванов В.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора "Энергия-2" для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы, 2008, Т. 44, № 4, С. 43-66.
- 3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики, М.: Научный мир. 2009. 668 С.
- 4. Шипилов Э.В. Позднемезозойский магматизм и кайнозойские тектонические деформации Баренцевоморской континентальной окраины: влияние на распределение углеводородного потенциала // Геотектоника, 2015, № 1, С. 60-85.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК АЛЬТЕРНАТИВА НАБЛЮДЕНИЯМ В АРКТИКЕ

А.А. Намгаладзе¹, М.А. Князева¹, М.И. Карпов¹, О.В. Золотов²

¹ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет»
²Мурманский филиал ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»
e-mail: namgaladze@yandex.ru

Аннотация. Для задач прогнозирования возмущений космической погоды над Арктическим регионом использование средств наземного и космического мониторинга недостаточно из-за: 1) их малого количества, 2) практической невозможности наращивания сети приемных устройств и, как следствие, 3) невозможности обеспечения требуемого пространственно-временного разрешения поставляемых ими данных. Альтернативой является физико-математическое моделирование с помощью глобальных трехмерных моделей верхней атмосферы Земли, учитывающих взаимодействие Арктического и примыкающих к нему регионов. Этим требованиям соответствует модель UAM (Upper Atmosphere Model). В работе приведены примеры ее применения для исследований высокоширотной ионосферы и определены пути повышения ее эффективности в практических целях.

Abstract. An application of satellite and ground-based observations is insufficient for forecasting space weather disturbances over the Arctic region because of: 1) their small number, 2) the practical impossibility of increasing the receiving station network and, as a consequence, 3) impossibility to provide the required spatial-temporal resolution of data supplied by them. The alternative is physical and mathematical simulation by using a global three-dimensional models of the Earth's upper atmosphere taking into account the interaction of the Arctic and adjacent regions. These requirements correspond to the UAM (Upper Atmosphere Model). The examples of its application to the high-latitude ionosphere studies and ways to improve model efficiency for practical purposes are presented in this paper.

Введение

Арктический регион наиболее восприимчив к возмущениям космической погоды, деструктивными последствиями которых являются нарушения радиосвязи, работы электронной аппаратуры спутников и самолетов, индуцирование паразитных токов в протяженных проводящих линиях энергопередач. Это определяет значимость прогнозирования возмущений космической погоды и их последствий.

Традиционно считается, что для этого необходимо использовать средства наземного и космического мониторинга, но их возможности в Арктике ограничены. Большую часть Арктического региона занимает Северный Ледовитый океан, на льдах которого невозможно разместить густую сеть приемных устройств. Имеющиеся станции вертикального зондирования ионосферы и радары некогерентного рассеяния расположены в очень небольшом количестве на континентальном побережье и островах Северного Ледовитого океана. Выше 70°N насчитывается около 40 станций, 39% из которых являются недействующими. К высокоширотным относятся всего 3 радара: EISCAT Свальбард (78°N, 16°E), EISCAT Тромсё (70°N, 19°E) и Сондрестром (67°N, 51°W). Ни один из них не действует в непрерывном режиме. Спутниковые навигационные системы GPS/ГЛОНАСС, широко используемые в низких и средних широтах, ограничены орбитами в пределах ±60° широты.

Поставляемые действующими средствами наземного и космического мониторинга разрозненные данные о состоянии верхней атмосферы над Арктикой не обеспечивают пространственно-временного разрешения, требуемого для задач мониторинга космической погоды и прогнозирования ее возмущений.

Альтернатива

Альтернативой является физико-математическое моделирование с помощью глобальных трехмерных моделей верхней атмосферы Земли, учитывающих взаимодействие Арктического и примыкающих к нему регионов. Этим требованиям соответствует модель UAM (Upper Atmosphere Model, http://uamod.wordpress.com, $Namgaladze\ et\ al.$, 1988, 1998), численно рассчитывающая глобальные распределения параметров основных нейтральных ($O,\ O_2,\ N_2$) и заряженных ($O_2^+,\ NO^+,\ O^+,\ H^+$, электроны) компонент околоземной среды в интервале 60–100000 км для любых широт и долгот с переменными шагами по времени и пространству. Модель описывает мезосферу, термосферу, ионосферу, плазмосферу и внутреннюю магнитосферу как единую самосогласованную систему путем численного интегрирования основных физических уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии для нейтральных и заряженных компонент. В UAM учтены все процессы, ответственные за передачу энергии и импульса от Солнца.

Сказанное не означает противопоставления данных наблюдений и теоретических (модельных) расчётов, что противоречило бы самой сути физики. Речь идёт о заполнении пробелов в местах и в периоды, где и когда наблюдения отсутствуют или в принципе невозможны. Приполюсные районы Арктики и Антарктики являются именно такими регионами, напрямую связанными с солнечным ветром, ответственным за "кухню космической погоды" и её возмущения, даже, если говорить только об одном геофизическом параметре – концентрации электронов. Многокомпонентность космической плазмы исключает такой однопараметрический подход, а её нестационарность и трёхмерность ещё более усложняют задачу.

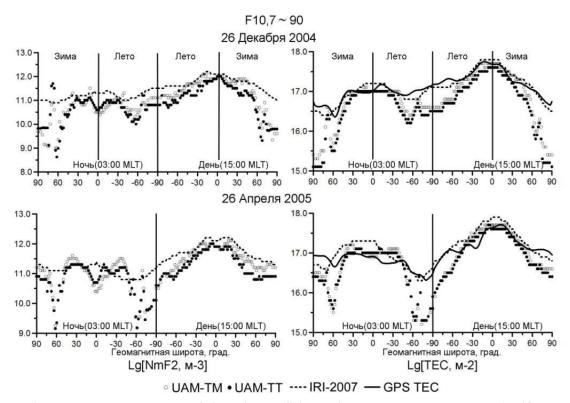


Рисунок 1. Широтные вариации NmF2 (слева) и TEC (справа) на магнитном меридиане 15–03 MLT при низкой солнечной активности по данным измерений и результатам моделирования.

Помимо объективных физико-математических трудностей на первый план выходят особенности экономического положения современной России. Её нарастающее технологическое отставание от передовых стран обобщённого Запада (США, Европы, Японии), а также Китая и Индии, и усиливающаяся самоизоляция России не оставляют шансов на так называемое «импортозамещение» даже при богатом наследии советских времён. Только там, где ещё сохранились интеллектуальные ресурсы и компьютерные технологии, имеется международно признанный задел, и где не требуются огромные финансовые ресурсы, можно на что-то надеяться.

Примеры сопоставлений расчетов по UAM с наблюдениями

Результаты модельных расчетов по UAM неоднократно сопоставлялись с различными данными наблюдений и эмпирическими моделями. Ниже приведены несколько примеров.

На рис. 1 представлены широтные вариации электронной концентрации в максимуме F2-слоя (NmF2) и полного электронного содержания (TEC) для магнитного меридиана 15–03 МLТ при низкой солнечной активности для различных сезонов. Модельные расчеты проводились с использованием двух версий UAM отличающихся способом расчета параметров термосферы: с инкорпорированной в UAM эмпирической моделью термосферы NRLMSIS-00 (на рис. 1 обозначено, как UAM-TM) и самосогласованной версией модели (UAM-TT). Результаты модельных расчетов сопоставлялись с данными эмпирической модели ионосферы IRI-2007 и вариациями TEC по данным GPS.

Наибольшее согласие модельных и экспериментальных данных имеет место для низких и средних геомагнитных широт (±45°) преимущественно на дневной стороне при низкой солнечной активности, а наибольшее расхождение значений – для высоких широт. Эмпирические данные сильно сглажены в высоких широтах и не воспроизводят такие реально наблюдающиеся особенности высокоширотной ионосферы, как главный ионосферный провал и провал легких ионов, обусловленные действием полярного ветра. Модель UAM воспроизводит обе эти особенности.

Несогласованность модельных результатов с данными IRI-2007 и данными GPS связана именно с

недостаточным количеством ионосферных наблюдений в области полярной шапки (*Ботова и др.*, 2014). На рис. 2 сопоставлены данные высокоширотного радара некогерентного рассеяния EISCAT Свальбард и

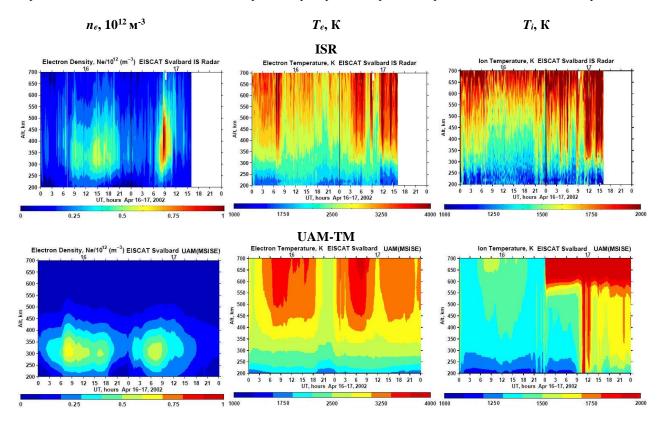


Рисунок 2. Высотно-временные вариации электронной концентрации (n_e) , электронной (T_e) и ионной (T_i) температур над Свальбардом 16–17 апреля 2002 года по данным радара некогерентного рассеяния (вверху, обозначены как ISR) и рассчитанные по модели UAM (внизу).

результаты моделирования по трем параметрам ионосферы: электронной концентрации, ионной и электронной температур для 16 (геомагнитно спокойный день) и 17 (день начала серии геомагнитных бурь) апреля 2002 года в диапазоне высот 200–700 км. Модель UAM успешно воспроизводит уменьшение электронной концентрации и возрастание обеих температур в первые часы после начала геомагнитной бури (около 12 UT 17 апреля) (Зубова, 2009).

На рис. 3 представлены высотно-широтные профили электронной концентрации вдоль меридиана 125° по данным томографии, IRI-2001, а также результаты модельных расчетов для сильно возмущенных условий 29–30 октября 2003 г. Анализ показывает, что модель UAM, в отличие от IRI-2001, воспроизводит динамику главного ионосферного провала, в частности, положение его экваториальной стенки (*Korableva et al.*, 2008). Представленные примеры наглядно демонстрируют способность модели UAM детально воспроизводить глобальное распределение параметров верхней атмосферы практически во всем диапазоне долгот, широт и высот как для спокойных, так и для возмущенных условий. Помимо этого, модель успешно применялась для исследования физических механизмов локальных возмущений, например, аномалии моря Уэдделла (*Князева и др.*, 2010), мезомасштабных возмущений глобальной электрической цепи с пространственными масштабами от нескольких сотен до 3000 км (*Zolotov et al.*, 2012; *Karpov et al.*, 2013).

Заключение

Для высокоширотной ионосферы, подверженной наиболее сильным возмущениям и определяющей глобальную космическую погоду, характерно фрагментарное покрытие средствами спутникового и наземного мониторинга. В этих условиях альтернативной наблюдениям становится менее ресурсоемкое использование физико-математических моделей околоземного пространства, таких как отечественная трехмерная модель верхней атмосферы Земли UAM. Как показано выше, эта модель успешно дополняет существующие и заменяет отсутствующие данные измерений не только в Арктическом регионе, но и в других областях, причем как глобальные, так и локальные возмущения.

Для повышения эффективности использования модели в практических целях воспроизведения поведения высокоширотной ионосферы в UAM необходимо осуществить ряд изменений:

1) заменить геомагнитное поле в дипольном приближении на эмпирическое (по данным спутниковых и

наземных наблюдений);

- 2) учесть инерцию ионов в полярном ветре, т.е. отказаться от диффузионного подхода;
- 3) повысить устойчивость решений уравнений магнитосферного блока UAM (для самосогласованного расчёта продольных токов зоны 2).

С решением этих задач удастся существенно продвинуть метод физико-математического моделирования в целях прогнозирования космической погоды и ее возмущений над Арктикой.

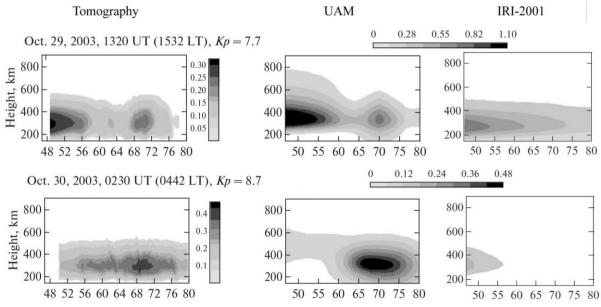


Рисунок 3. Высотно-широтные профили электронной концентрации $(10^{-12} \text{ м}^{-3})$ вдоль меридиана 125° по данным томографии (слева), результатам численных расчетов (в центре) и по данным IRI-2001 (справа) для возмущенных условий 29-30 октября 2003 г.

- 1. Karpov M.I., Namgaladze A.A., Zolotov O.V. (2013) Modeling of Total Electron Content Disturbances Caused by Electric Currents between the Earth and the Ionosphere, R. J. Phys. Chem. B, 7, 5, 594-598. doi: 10.1134/S1990793113050187.
- 2. Korableva I.V., Namgaladze, A.A., Namgaladze A.N. (2008) High-Latitude Ionosphere during Magnetic Storms of October 26, 2003–November 1, 2003: Tomographic Reconstructions and Numerical Modeling, Geomagn. Aeron., 48, 5, 642–651, doi: 10.1134/S0016793208050095.
- 3. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. (1988) Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system, Pure Appl. Geophyc. 127, 2/3, 219-254, doi: 10.1007/BF00879812.
- 4. Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Volkov M.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu. (1998) High-latitude version of the global numeric model of the Earth's upper atmosphere, Вестник МГТУ, 1, 2, 23-84.
- 5. Zolotov O.V., Namgaladze A.A., Zakharenkova I.E., Martynenko O.V., Shagimuratov I.I. (2012) Physical interpretation and mathematical simulation of ionospheric precursors of earthquakes at midlatitudes, Geomagn. Aeron, 52, 3, 390–397. doi: 10.1134/S0016793212030152.
- 6. Ботова М.Г., Романовская Ю.В., Намгаладзе А.А. (2014) Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений, Вестник МГТУ, 17, 2, 385-393.
- 7. Зубова Ю.В. Ионосферные возмущения по наблюдениям на установках некогерентного рассеяния и их математическое моделирование, Дис. ... канд. ф.-м. наук, Мурманск, 145 c. 2009.
- 8. Князева М.А., Зубова Ю.В., Намгаладзе А.А. (2010) Численное моделирование аномалии моря Уэдделла в поведении F2-области ионосферы, Вестник МГТУ, 13, 4/2, 1068-1077

ВЫСЫПАНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И ВЫСОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАЗРЯДЫ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА СПУТНИКАХ «ВЕРНОВ» И «ЛОМОНОСОВ»

М.И. Панасюк^{1,2}, С.И. Свертилов^{1,2}, В.В. Богомолов^{1,2}, Г.Г. Гарипов¹, А.В. Богомолов¹, А.Ф. Июдин¹, М.А. Казначеева¹, В.В. Калегаев¹, П.А. Климов¹, И.А. Максимов¹, И.Н. Мягкова¹, В.Л. Петров¹, А.В. Прохоров^{1,2}, К.Ю. Салеев^{1,2}, И.В. Яшин¹

¹Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2 ²Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2 e-mail: sis@coronas.ru

Аннотация. Приводятся результаты наблюдений высыпающихся магнитосферных электронов и высотных электромагнитных разрядов в полярных областях по данным измерений с комплексом научной аппаратуры РЭЛЕК на спутнике "Вернов", проводившихся с июля по декабрь 2014 г. Спутник "Вернов" имел солнечно синхронную орбиту с высотой от 640 до 830 км и наклонение - 98.4°, что создавало благоприятные условия для регулярных измерений в полярных областях. Аппаратура РЭЛЕК включала спектрометр жесткого рентгеновского, гамма-излучения (0.01-3.0 МэВ) и электронов (0.2-10.0 МэВ) ДРГЭ - основной прибор для регистрации атмосферных гамма-вспышек и высыпаний электронов и ультрафиолетовый фотометр ДУФ. В приборе ДРГЭ предусмотрена как непрерывная запись скорости счета регистрируемых частиц и квантов с временным разрешением 1 с, так и фиксация времени регистрации каждого гаммакванта или электрона с точностью ~15 мкс, а также их энергии. Прибор ДУФ обеспечивал регистрацию вспышек ультрафиолетового и красного излучения с разрешением 500 мкс. Высокое временное приборов позволило не только проводить детальный анализ переменности, но и сопоставлять измерения временных профилей событий, полученных с разными приборами комплекса, а также с данными других космических аппаратов и наземных измерений. В ходе эксперимента в различных энергетических каналах построены детальные временные профили интенсивности магнитосферных электронов в областях высыпаний, а также созданы базы данных по всплескам ультрафиолетового и красного излучения, в том числе, регистрируемых в высокоширотных областях. Зарегистрированы кандидаты в атмосферные всплески гамма-излучения, в том числе и в высокоширотных областях. Обсуждается возможная связь указанных явлений. Также обсуждаются предварительные данные наблюдений высыпаний магнитосферных электронов на спутнике «Ломоносов».

Abstract. There are presented the results of observations of precipitated magnetosphere electrons and high altitude electromagnetic discharges in Polar Regions, which were made with the RELEC instruments on board the Vernov satellite from July to December, 2014. The Vernov satellite has a solar-synchronous orbit with altitude from 640 to 630 km and inclination 98.4° that provided the appropriate conditions for regular observations in the Polar Regions. The RELEC instruments include the spectrometer DRGE of hard X-rays, gamma rays (0.01-3.0 MeV) and electrons (0.2-10.0 MeV), which was the main instrument for terrestrial gamma ray flash and electro precipitation observations and the ultraviolet photometer DUV. The continuous recording of detecting particles and quanta with 1 s time resolution as well as event by event mode with fixation of energy and time of each detecting gamma quantum and electron with accuracy about 15 mcs were foreseen in the instrument. The DUV instrument provided the ultraviolet and red flashes detection with 500 mcs accuracy. Due to the fine time resolution of a instruments the detailed analysis of time variability and comparing of event time profiles obtained from different Vernov instruments and from other space and ground experiment data were realized. During the experiment the detailed time profiles of magnetosphere electron intensity in precipitation regions were obtained in different energy channels as well as the databases on ultraviolet and red flashes including observations in high latitude regions were created. There were detected candidates in atmosphere gamma ray flashes including those in high latitude regions. The possible connection of these phenomena is discussed. The preliminary results of observations of magnetosphere electron precipitations on board Lomonosov spacecraft are also discussed.

Введение

Исследование обусловленных высотными электромагнитными разрядами быстропротекающих (транзиентных) энергичных явлений (Transient Energetic Phenomena, TEP) в атмосфере Земли и их возможной связи с высыпаниями магнитосферных релятивистских электронов было одной из главных задач космического эксперимента на спутнике «Вернов». Понятие TEP подразумевает гамма-всплески земного происхождения (Terrestrial Gamma Flashes, TGF) и транзиентные световые явления (Transient Luminous Events, TLE), к которым относятся наблюдающиеся в различных диапазонах видимого света «спрайты»,

«эльфы», «голубые струи», а также обнаруженные в экспериментах на спутниках «Татьяна-Университетский» и «Татьяна-2» вспышки ультрафиолетового (УФ) излучения (Садовничий и др., 2011). Космический аппарат «Вернов» был выведен 8 июля 2014 г. на полярную (640×830 км) солнечно-синхронную орбиту с наклонением 98.4° и периодом обращения 100 мин. Научная аппаратура включала детекторы гамма-квантов (0.01-3.0 МэВ) и электронов (0.2-15.0 МэВ), предназначенные для изучения гамма-всплесков земного и астрофизического происхождения, вариаций потоков магнитосферных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, фотометр УФ (240-400 нм) и красного (610-800 нм) излучения, а также УФ телескоп для наблюдений транзиентных световых явлений в атмосфере Земли. Кроме того, в состав комплекса научной аппаратуры входили низкочастотный и радиочастотный анализаторы, обеспечивавшие измерение магнитного поля и регистрацию электромагнитных волн в диапазонах от 0.1 Γ ц до 40 к Γ ц и 0.05-15.0 М Γ ц (Панасюк и др., 2016а). Особенности орбиты спутника позволяли проводить наблюдения, как низкоширотных, так и высокоширотных областей атмосферы. Кроме того, полярная орбита обеспечивала благоприятные условия для регистрации разных типов высыпаний магнитосферных электронов.

Гамма-всплески и вспышки оптического излучения в высокоширотных областях

Для детектирования гамма-всплесков из атмосферы Земли использовались 4 сцинтилляционных (NaI(TI)/CsI(TI)) детектора гамма-квантов в составе блоков ДРГЭ-1, ДРГЭ-2 прибора ДРГЭ. Суммарная эффективная площадь этих детекторов составляла \sim 500 см², оси детекторов были сонаправлены и ориентированы в местный надир. При этом поле зрения всех 4 детекторов составляло 2π ср. Для отбора гамма-всплесков использовался, т.н. пособытийный режим, когда для каждого детектируемого гамма-кванта фиксировалось время регистрации и значения кодов амплитуды выходного сигнала, соответствовавших энергии выделившейся в кристаллах. Первоначально в качестве кандидатов в гамма-всплески земного происхождения отбирались наиболее значимые события, для которых выполнялось условие значимого превышения среднего фонового счета на временном интервале 1 мс одновременно не менее чем в двух детекторах. Поскольку гамма-всплески земного происхождения характеризуются жестким энергетическим спектром, отбирались только события с энерговыделением >400 кэВ. Для экваториальных областей критерий значимости соответствовал одновременной регистрации возрастаний двумя детекторами на уровне достоверности 12σ или тремя детекторами на уровне 7σ . Для высокоширотных областей (полярной шапки) этот критерий соответствовал 8.5σ при регистрации двумя детекторами или 5σ при регистрации тремя детекторами.

После исключения возрастаний интенсивности, связанных с регистрацией тяжелых заряженных частиц, были отобраны собственно кандидаты в гамма-всплески земного происхождения, удовлетворившие указанному «жесткому» критерию (Панасюк и др., 2016б). Положения подспутниковой точки в момент регистрации всплесков отмечены на карте, изображенной на рис. 1.

Среди отобранных кандидатов особого внимания заслуживает событие №5, зарегистрированное в полярной области над Антарктидой 02.11.2014 в 03:34:14.051UT. Этот всплеск отличался большей (~2.5 мс) длительностью по сравнению с остальными кандидатами, длительность которых (<400 мкс) типична для гамма-всплесков земного происхождения, которые обычно связывают с грозовой активностью. С учетом положения источника этого всплеска можно сделать вывод о весьма малой вероятности его связи с грозой Был также проведен отбор кандидатов в гамма-всплески земного происхождения по более «мягкому» критерию, не включавшему требование совпадения значимых возрастаний интенсивности в нескольких детекторах. Согласно этому критерию отбирались события, для которых в отдельном детекторе за 400 мкс регистрировалось не менее 5 гамма-квантов в экваториальных областях и не менее 7 в полярных. Для данных, полученных с помощью детектора ДРГЭ-11, для которого время экспозиции было наибольшим, большинство возрастаний в полярных областях были имитациями всплесков тяжелыми заряженными частицами космических лучей, и только одно, зарегистрированное 22.11.14 в 5:05:03 UT, может рассматриваться как кандидат в гамма-всплески. Это событие также наблюдалось над Антарктидой (см. рис. 1, №6) и, по-видимому, также не было связано с грозовой активностью.

С помощью прибора ДУФ было зарегистрировано несколько тысяч атмосферных всплесков УФ и красного излучения. Временные профили зарегистрированных вспышек отличаются большим разнообразием. Среди них есть как одиночные всплески, так и очень сложные структуры, возможно обусловленные высвечиванием обширных областей, содержащих возбужденные молекулы азота и кислорода. В эксперименте с прибором ДУФ на спутнике «Вернов» также подтверждено обнаруженное ранее на спутнике «Университесткий-Татьяна-2» новое явление серии вспышек ультрафиолетового излучения (Садовничий и др., 2011). Помимо отдельных событий и серий вспышек, наблюдающихся в основном над материками в областях активного грозообразования, довольно много всплесков было зарегистрировано над Мировым океаном и на высоких широтах. Последние в основном были зарегистрированы в Южном полушарии вплоть до Антарктиды (см. рис. 1). Следует отметить, что всплески, наблюдавшиеся в полярных областях, характеризуются временными профилями в виде одиночных пиков, которые видны и в УФ, и в красном каналах (см. рис. 2).

Эти всплески по своей временной структуре отличаются морфологически от событий, вероятно ассоциированных с грозовыми разрядами, поскольку последние, как правило, отличаются сильно изрезанным профилем с доминированием УФ излучения.

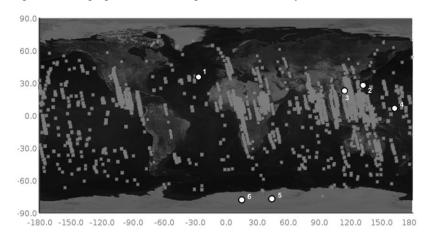


Рисунок 1. Карта, иллюстрирующая положения подспутниковых точек (и соответственно направления осей детекторов) в момент регистрации УФ всплесков и кандидатов в гамма-всплески земного происхождения (отмечены цифрами).

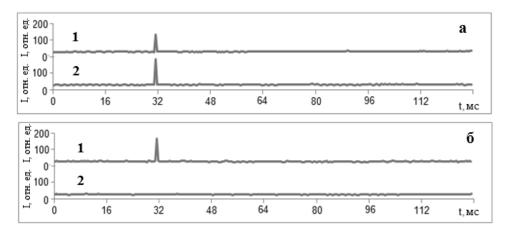


Рисунок 2. Пример временных профилей всплесков УФ (кривые 1) и красного (кривые 2) излучения, зарегистрированных в высокоширотных областях: а – событие 28.11.14, 19.03.08 UT, $\phi = 69.4^{\circ}$, $\lambda = 7.5^{\circ}$, б – событие 28.11.14, 18.55.55 UT: $\phi = 44.2^{\circ}$, $\lambda = 24.0^{\circ}$. Синим цветом показан временной профиль интенсивности УФ излучения, красным цветом – красного, ϕ , λ - географическая широта и долгота подспутниковой точки.

Высыпания магнитосферных электронов

Для регистрации электронов высоких энергий использовались в основном детекторы блока ДРГЭ-3 прибора ДРГЭ. Этот блок состоял из трех идентичных трехслойных сцинтилляционных фосвич-детекторов (CsI(Tl)/BGO/пластмассовый сцинтиллятор) с осями, разнесенными перпендикулярно друг другу, при этом ось детектора №1 была направлена в местный зенит, детектора №2 – против вектора скорости космического аппарата, ось детектора №3 под углом 90° к плоскости, образованной векторами скорости и направлением в местный зенит (практически перпендикулярно плоскости орбиты). Поле зрение каждого детекторного узла было ограничено оловянным коллиматором таким образом, что при эффективной площади одного детектора \sim 2 см², его геометрический фактор составлял \sim 2 см²ср. Также, релятивистские электроны регистрировались по тормозному излучению с помощью детекторов гамма-квантов ДРГЭ-1(2).

Как известно, высыпания электронов из радиационных поясов связаны, прежде всего, с волновой активностью в разных диапазонах длин волн и частот (от 0.1 Гц до 15 МГц). Такие высыпания неоднократно наблюдались в холе полета спутника «Вернов» в различных областях околоземного пространства, в том числе, в полярных областях, при пересечении дрейфовых оболочек, соответствующих внутренней кромке внешнего радиационного пояса. Пример подобных высыпаний представлен на рис. 3. Как видно из рисунка, при пересечении дрейфовых оболочек L ~ 8.3, 6.9, 5.9 наблюдаются локальные по времени возрастания скорости счета всех трех детекторов электронов, причем, примерно одинаковой величины, в отличие от «подложки», соответствующей измерениям потока электронов во внешнем поясе, когда детектор №1, ориентированный вдоль силовой линии магнитного поля, показывал существенно более низкий счет по сравнению с двумя другими, ориентированными преимущественно перпендикулярно силовой линии. Такие показания естественным образом отражают тот факт, что потоки высыпающихся частиц гораздо более

изотропны по сравнению с захваченными. При этом отмеченные пики возрастаний интенсивности вероятно связанны с регистрацией высыпающихся электронов в области изотропизации на внутренней границе внешнего пояса, которые могут быть обусловлены рассеянием на электромагнитных (ЭМ) волнах низкой частоты, в частности ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волнах (Яхнин и др.., 2016).

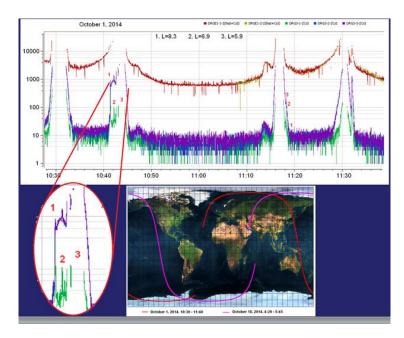


Рисунок 3. Временной профиль счета электронов вдоль одного витка орбиты: зеленым цветом показана скорость счета, соответствующая диапазону 150 - 300 кэВ детектора №1 блока ДРГЭ-3, синим цветом – детектора №2, лиловы детектора №3. Красным и салатовым цветом показаны временные зависимости интегральной (Е > 15 кэВ) скорости счета тормозного гаммаизлучения детекторов ДРГЭ-11 и ДРГЭ-12. В левой нижней части рисунка более подробно изображена часть профиля, содержащая пики. соответствующие высыпаниям. Также в нижней части рисунка изображены проекции орбиты Земли, орбита, спутника на карту приведенным соответствующая временным зависимостям выделена красным.

Следует отметить, что подобные высыпания электронов субрелятивистских энергий также наблюдаются на спутнике «Ломоносов», который был запущен 28 апреля 2016 г. и имеет схожую с КА «Вернов» орбиту – солнечно-синхронную, но с меньшей высотой (490 км).

Высыпающиеся релятивистские электроны в принципе могут создавать условия для возникновения высотных разрядов в мезосфере. В пользу такого предположения как раз свидетельствуют зарегистрированные в полярных областях кандидаты в гамма-всплески земного происхождения и вспышки оптического излучения.

- 1. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзиентые энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч.І. Описание эксперимента // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 4, С. 277-285
- 2. Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V. et al. Experiment on the *Vernov* Satellite: Transient Energetic Processes in the Earth's Atmosphere and Magnetosphere. Part I: Description of the Experiment // Cosmic Research. 2016. V. 54. № 4. P. 261-269.
- 3. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзиентые энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч.П. Первые результаты // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 5, С. 369-376.
- 4. Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V. et al. Experiment on the *Vernov* Satellite: Transient Energetic Processes in the Earth's Atmosphere and Magnetosphere. Part II. First Results // Cosmic Research. 2016. V. 54. № 5. P. 343-350.
- 5. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др. Исследование космической среды на микроспутниках «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2» // Астрономический вестник. 2011. Т. 45. №. 1. С. 5–31.
- 6. Sadovnichy V.A., Panasyuk M.I., Yashin I.V. et al. Investigations of the space environment aboard the Universitetsky-Tat'yana and Universitetsky-Tat'yana-2 microsatellites // Solar System Research. 2011. V. 45. № 1. P. 3–29.
- 7. Yahnin, A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Gvozdevsky B.B., and Pashin A.B. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016, V. 121. doi:10.1002/2016JA022765.

НАБЛЮДЕНИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ СВЕТОВЫХ ВСПЫШЕК, ВЫЗВАННЫХ МОЛНИЕВЫМИ РАЗРЯДАМИ В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ

В.К. Ролдугин 1 , А.В. Ролдугин 1 , Н.Г. Клеймёнова 2

Абстракт. Во время эксперимента АРАКС в 1975 г в Архангельской области было обнаружено, что антенный пробой мощной передающей ОНЧ антенны, расположенной вблизи Архангельска, вызвал высыпание захваченных частиц из дакта длительностью 0.5 с и размером в ионосфере около 12 км. Мощность молниевых разрядов превышает мощность пробоя, поэтому представляет интерес поиск высыпаний, вызванных молниевым разрядом в магнитосопряжённой точке. В работе анализировались снимки камеры всего неба в Ловозеро во время регистрации свистящих атмосфериков на финской обсерватории Каннуслехта. Было обнаружено несколько случаев светящихся пятен в моменты свистов.

Abstract. It was found during the ARAKS experiment in 1975 in Arkhangelsk region that disruptive discharge of the powerful transmitting VLF antenna near Arkhangelsk city had initiated the precipitation of trapped particles from a duct with duration about 0.5 s and with size in the ionosphere by 12 km. As power of lightning exceeds significantly the power of antenna discharge, then it is of interest to seek events of particle precipitations due to lightning in magnetic conjugated point. In this work we analyze ascafilms in Lovozero observatory during whistling atmospheric in Finnish Kannuslehta observatory. Several events of luminous spots at time of whistlers are revealed.

Введение

В 1975 году в сопряженных точках Кергелен-Архангельская область проводился эксперимент АРАКС. С французского острова Кергелен на ракете был запущен советский ускоритель электронов до 30 кэВ, а в сопряжённом районе в Архангельской области располагались наблюдатели, в первую очередь, с оптической аппаратурой для наблюдения искусственного сияния. Эффекта от электронного пучка обнаружено не было, но было обнаружено светящееся пятно размером около 12 км на высоте 100 км за 19 с до первой инжекции электронов с ракеты. Этот результат описан в работе [*Ролдугин*, 2013]. Исследование данных, полученных во время эксперимента, позволило установить, что пятно было вызвано антенным пробоем низкочастотной антенны вблизи Архангельска. Параметры антенны приведены в работе [Чмырёв и др., 1976].

Антенный пробой уступает по мощности молниевому разряду, поэтому можно предположить, что при некоторых условиях свистящие атмосферики (далее просто «свисты»), вызванные молниевыми разрядами, могут вызвать высыпание захваченных частиц из дакта, вдоль которого они распространяются в магнитосфере Земли из одного полушария в другое. Было установлено несколько фактов, подтверждающих это предположение. Так, *Ю. Надубович* [1975] обнаружил на записях фотометров, отстоящих друг от друга на сотню километров, одновременные короткие (порядка одной секунды) вспышки свечения неба в невозмущенное время. Объяснить это возможно только вспышкой свечения неба на высоте около 100 км. Аналогичные совпадающие вспышки были обнаружены также и на записях фотометрической сети ПГИ.

Кроме того, выполненные в Турции фотометрические наблюдения ночного неба [Ögelman, 1973] обнаружили похожее явление - миллисекундные световые импульсы. Они появлялись часто, до нескольких раз в час, зимой много чаще, чем летом, с максимумом в суточном ходе около 16 UT или ранее. Магнитосопряженная точка Турции находится в центральной Африке вблизи области центра мировой грозовой активности, которая максимальна там около 16 UT. Подобное световое пятно также отмечалось при телевизионных наблюдениях северной Финляндии (L=5.5) 9 октября 1991 г. [Manninen and Turunen, 1992]. Пятно имело диаметр около 10 км. Существенной особенностью его была большая длительность свечения (~ 4 с). Явление сопровождалось свистом (whistler) с носовой частотой ~2.5 кГц.

В последнее время стали появляться работы, посвященные экспериментальным исследованиям высыпания частиц под действием молниевых разрядов. Так, Lehtinen et al. [2001] теоретически рассмотрели возможность высыпания в сопряжённую ионосферу электронных пучков под воздействием молниевых разрядов. Попытка экспериментального обнаружения световых вспышек от молний в магнитосопряжённой области выполнена Marshall et al. [2005]. Фотометрические наблюдения проводились в южноафриканской обсерватории вблизи Sutherland, а регистрация молниевых разрядов - во французских Пиренеях. Из 130 случаев спрайтов в Пиренеях свисты в африканской обсерватории были обнаружены в 30, но ни в одном случае оптических эффектов обнаружено не было.

 $^{^{1}}$ Полярный геофизический институт, Aпатиты

 $^{^{2}}$ Институт физики Земли, Москва

Следует отметить, что на спутнике DEMETER *Inan et al.* [2007] обнаружили кратковременные высыпания электронов, вызванные, по-видимому, молниевыми разрядами в противоположном полушарии, сопровождающимися свистами, распространяющимися вверх от молний. Иногда обнаруживались и свисты, отражённые от сопряжённой ионосферы.

Как следует из работы [Peter and Inan, 2007], в США существует сеть длинноволновых приёмников для изучения распространения молниевых сигналов (HAIL, Holographic Array for Ionospheric/Lightning Research) на $L\sim 2.2$. При обработке данных используются теоретические модели, учитывающие высыпание частиц под действием ОНЧ-излучений, вызванных разрядами молний. В работе сообщается, что по их расчетам высыпание происходит в области на 6° полярнее молнии, при этом из трубки высыпается $\sim 0.001\%$ захваченных частиц.

Возможная яркость эмиссий N2 1PG и O(1S) 5577 Å, вызванных высыпанием энергичных электронов, вызванных молниевыми разрядами, была оценена в работе [Marshall et al., 2011]. Однако авторами был получен малоутешительный результат – яркость свечения составляет от нескольких единиц до 10 релей, т.е. величину на грани возможностей обычной аппаратуры для наблюдения сияний.

Целью данной работы является продолжение экспериментальных исследований возможного эффекта высыпаний энергичных электронов, вызванных разрядом молнии в противоположном полушарии. Для этого были сопоставлены фотометрические наблюдения в Ловозеро с финскими ОНЧ наблюдения вблизи геофизической обсерватории Соданкюля в пункте Kannuslehto (географические координаты: ϕ =67.74° N, λ = 26.27° E, исправленные геомагнитные координаты: Φ =64.2°; Λ =107.9°, L<5.5). Обсерватория Ловозеро расположена на близкой геомагнитной широте, но на 400 км к востоку. Наблюдения в Каннуслехто проводятся в виде отдельных кампаний в зимнее время в течение одного-двух месяцев, начиная с 2006 г. Результаты спектрально-временного анализа данных наблюдений находятся в свободном доступе на сайте обсерватории Соданкюля (http://oldwww.sod.fi/vlf/VLFPlots) в виде минутных и часовых спектрограмм в полосе 0-16 кГц.

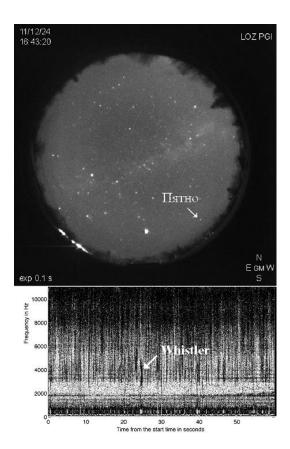


Рисунок 1. Вверху — аскафильм камеры всего неба (Ловозеро) в 16:43:20 UT 24 декабря 2011. Стрелкой показано появившееся в этот момент пятно. Внизу — спектрограмма ОНЧ в Каннуслехто.

Таблица. Время прихода свиста и						
появления пятен						
Дата	Время	Время				
дата	пятна, UT	свиста, UT				
24.12.2011	16h43m20s	16h43m23s				
20.12.2012	21h58m00s	21h58m01s				
21.12.2012	00h08m30s	00h08m31s				
10.01.2013	02h53m13s	02h53m13s				
10.01.2013	02h54m42s	02h54m44s				

Камера всего неба в Ловозеро проводила съёмку с частотой 1 кадр в секунду с экспозицией 0.05 с или 0.1 с. На аскафильмах обнаруживались световые пятна неизвестного происхождения. Некоторые из них перемещались по небу в течение десятков секунд, и были нами отождествлены с пролетами самолётов, другие можно было интерпретировать как метеорные следы или сигнальные ракеты.

Однако было найдено несколько случаев световых пятен, появляющихся во время прихода отдельных свистов. Эти события, по-видимому, можно отнести к искомому эффекту, т. е. к высыпанию возможному электронов магнитосферы под действием молниевых разрядов. Было найдено, что обычно ОНЧ сигнал запаздывал относительно появления светового пятна на время до 3 с. В таблице приведено время появление световых пятен в обс. Ловозеро и свистов в Каннусехто для 5 событий.

Результаты наблюдений

Для выявления случаев свистов были просмотрены минутные спектрограммы ОНЧ-излучений в декабрях и январях 2011–2013 гг. При этом рассматривались только безлунные интервалы с хорошей прозрачностью неба. Точность определения момента прихода свистов составляла менее 1 с

Пятна во всех выявленных случаях располагались в южной половине неба. Они отмечались только на одном кадре, следовательно, время их жизни не превышало 1 с. Изображение состояло из двух-четырёх пикселей, поэтому не может быть интерпретировано как помеха, или вспышка одного пикселя вследствие попадания энергичной космической частицы.

Один из рассмотренных явлений (может быть, не самый удачный) приведён на рисунке 1, где вверху показан ловозёрский аскафильм для случая 24 декабря 2011 г. Хорошо виден Млечный путь, проходящий через зенит. Географическая ориентация камеры указана внизу справа. Пятно на юго-западе показано стрелкой. Внизу показана спектрограмма ОНЧ излучений в Каннуслехто для одной минуты 16. 43 UT. Из-за малой интенсивности свиста видна лишь его часть от 2.5 до 5 кГц длительностью приблизительно в одну секунду. Заметим, что позднее (после 19 UT, когда фотометрическая регистрация в Ловозеро была выключена) в Каннуслехто наблюдалось несколько типичных серий свистов с эхо до 5-6 сигналов в группе, что свидетельствует о наличии в этот день устойчивых дактов, канализирующих ОНЧ сигналы из противоположного полушария. Как правило, такие дакты существуют в течение нескольких часов. Сопоставление приведенного на рис. 1 свиста с этими сериями показывает, что это на рис 1 показана лишь верхняя, наиболее короткая часть сигнала, низкочастотная часть свиста доходила до ~ 2 кГц (критическая частота волновода) и продолжалась еще около 3 с.

Для данного случая время запаздывания светового пятна относительно видимого на спектрограмме свиста, т.е. верхней части сигнала, 3 с. Как видно из аскафильма, авроральная активность в окрестности Ловозера в это время отсутствовала, как и в остальных случаях. В отдельных событиях, как, например, 21 декабря 2012 и 10 января 2013 наблюдались двойные пятна с расстоянием между ними в 3° - 5°.

Обсуждение результатов

Одновременные наблюдения неба на близлежащих, порядка десятков километров, обсерваториях позволили бы со 100% уверенностью утверждать, что обнаруженные пятна располагаются на высотах около 100 км. Сейчас же можно указать на другие факты в пользу ионосферного их происхождения пятен. Сопряжённая с Ловозеро точка имеет географические координаты ϕ = -57.08°, λ = 68.45°, это пролив Дрейка между м. Горн, оконечным в Южной Америке, и Антарктидой. Обнаружить там молниевый разряд представляется маловероятным. В наших случаях пятна находились на южной стороне небосвода, на силовой линии, расположенной экваториальнее сопряжённой точки на несколько градусов, и там молнии бывают много чаще. Как видно из приведенного выше обзора, теоретические расчёты и экспериментальные наблюдения скептически относятся к возможности наблюдать рассматриваемое высыпание. Однако результаты, полученные в эксперименте APAKCe, и наблюдения [*Manninen and Turunen*, 1992], а также всплески на фотометрических записях надёжно свидетельствуют, что такое высыпание существует и может иметь значительную интенсивность. Все эти события наблюдались в субавроральных широтах.

В то же время видно, что это явление практически не изучено и требует, прежде всего, целенаправленных поисков. Не установлено, какой молниевый разряд может привести к рассматриваемому эффекту: разряд между двумя облаками, от облака к земле или от облака к ионосфере? Обязательно ли наличие магнитосферного канала (дакта)? Выше или ниже широты плазмопаузы возможно явление? Всегда ли совпадают область высыпания и область наблюдения соответствующего свиста? Является ли свист лишь репером молниевого разряда или сам приводит к высыпанию частиц? Решение этих и других близких вопросов позволит понять условия, когда молниевый разряд приводит к высыпанию из магнитосферы захваченных частиц.

Заключение

Сопоставление снимков камеры всего неба в обс. Ловозеро и записей ОНЧ в Каннуслехто выявило случаи появления световых пятен в южной части неба над Ловозером одновременно или с опережением на 1-3 с свиста в Каннуслехте, что может интерпретировано как высыпание частиц из магнитосферы вследствие молниевого разряда вблизи сопряженной области.

Авторы выражают благодарность Юрки Маннинену (обс. Соданкюля, Финляндия) за предоставление спектрограмм ОНЧ излучений в Кануслехто.

- 1. Надубович Ю.А. Геофизические условия возникновения коротковременных оптических вспышек излучения ночного неба // Физика верхней атмосферы высоких широт: сб. 1975. Вып. 3. Якутск. С. 134—150.
- 2. Ролдугин В.К. Об одной возможности исследования реакции магнитосферы на активные воздействия // Вестник КНЦ. №2, стр. 75- 78. 2013.
- 3. Чмырёв В.М., Ролдугин В.К., Жулин И.А., Могилевский М.М., Ди В.И., Кошелевский В.А., Бушмарин В.А., Распопов О.М. Искусственная инжекция очень низкочастотных (ОНЧ) волн в ионосферу и магнитосферу Земли. Письма в ЖЭТФ, т. 23, №8, 1976.
- 4. Inan, U. S., D. Piddyachiy, W. B. Peter, J. A. Sauvaud, and M. Parrot. DEMETER satellite observations of lightning-induced electron precipitation // Geophys. Res. Lett., 34, L07103, doi:10.1029/2006GL029238, 2007.
- 5. Lehtinen, N. G., U. S. Inan, and T. F. Bell. Effects of thunderstorm driven runaway electrons in the conjugate hemisphere: Purple sprites, ionization enhancements, and gamma rays // J. Geophys. Res., 106, 28841, 2007.
- 6. Manninen J. and Turunen T. Intensive short-lived ionospheric optical emission triggered by whistler // Proceedings of the 19th conference on atmospheric studies on August 10–14. Kiruna, Sweden, P. 161–166, 1992.
- 7. Marshall R. A., Inan U. S., Neubert T., Hughes A., Satori G., Bor J., Collier A., and Allin T. H. Optical observations geomagnetically conjugate to sprite-producing lightning discharges // Annales Geophysicae. Vol. 23 P. 2231–2237. 2005
- 8. Marshall, R. A., J. Bortnik, N. Lehtinen, and S. Chakrabarti. Optical signatures of lightning-induced electron precipitation, J. Geophys. Res., 116, A08214, doi:10.1029/2011JA016728. 2011.
- 9. Ögelman H. Millisecond time scale atmospheric light pulses associated with solar and magnetic activity // J. Geophys.Res. Vol. 78, № 16. P. 3033–3039. 1973.
- 10. Peter, W. B., and U. S. Inan. A quantitative comparison of lightning-induced electron precipitation and VLF signal perturbations // J. Geophys. Res., 112, A12212, doi:10.1029/2006JA012165, 2007

СХОДСТВО ПАРАМЕТРОВ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В F-ОБЛАСТИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ И СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Н.Ю. Романова (ФГБНУ «Полярный геофизический институт», Мурманск, Россия, e-mail: romanova@pgi.ru)

Аннотация. Методом радиозондирования исследованы естественные мелкомасштабные неоднородности (с размерами от сотен метров до первых километров) электронной плотности в F-области среднеширотной ионосферы. Показано, что, как и в высоких широтах, среднеширотные неоднородности поперечно-анизотропны. По результатам численного сопоставления между ориентацией поперечной анизотропии $\Psi_{\rm A}$ и направлением горизонтального ветра (модель HWM07) установлено, что в средних широтах мелкомасштабные неоднородности вытянуты вдоль направления горизонтального ветра подобно тому, как в высоких широтах они вытягиваются вдоль направления дрейфа плазмы.

Abstract. By method of radio probing are investigated natural small-scale irregularities (with sizes from hundreds meters to the first kilometers) electronic density in the F-region of a midlatitude ionosphere. It is shown that, as well as in high latitudes, midlatitude irregularities have been cross-field anisotropy. By results of numerical comparison between the orientation of cross-field anisotropy Ψ_A and the horizontal wind direction (HWM07 model) it is found that in middle latitudes small-scale irregularities are extended along the direction of horizontal wind just as in high latitudes they are extended along the direction of plasma drift.

Введение

Известно, что естественные мелкомасштабные неоднородности электронной плотности (от нескольких сотен метров до первых километров) в F-области ионосферы вытянуты вдоль геомагнитного поля. В работе [1] они классифицированы по соотношению осей: стержни (rods, соотношение осей a:1:1), крылья (wings, a:b:1, a>b) и листы (sheets, a:a:1). Соответственно, соотношения осей: 5:1:1, 10:5:1 и 10:10:1. Предполагается, что наблюдение стержней более вероятно в высоких широтах, а наблюдение крыльев и листов - в средних широтах. С использованием метода спутникового радиозондирования и математической обработки радиосигнала [2], разработанного в Полярном геофизическом институте (ПГИ), в работе [3] определены параметры анизотропии неоднородностей в высокоширотной F-области. Вытянутость неоднородностей вдоль геомагнитного поля (ось α) меняется от 10 до 100-150. Вытянутость перпендикулярно геомагнитному полю (ось в) меняется от 3 до 30-40, т.е. неоднородности поперечно-анизотропны. Буквенные обозначения а и в имеют тот же физический смысл, что и буквенные обозначения а и b в работе [1]. Ориентация поперечной анизотропии Ψ_{A} меняется от 1° до 178° и соответствует направлению дрейфа плазмы $E \times B$ в Fобласти [4-6]. Исследование методом Терещенко и др. [2] среднеширотных неоднородностей показало, что они также вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля, в некотором направлении перпендикулярно ему, и параметры а и в численно схожи с параметрами высокоширотных неоднородностей [7]. Исследование среднеширотных неоднородностей также выявило различную ориентацию их поперечной анизотропии Ψ_A при различных геофизических условиях, что не могло быть вызвано электромагнитным дрейфом вследствие малости величины электрического поля (1-5 мВ/м) в средних широтах в спокойных условиях. Механизмом, управляющим ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A в средних широтах, аналогично дрейфу плазмы E×B в высоких широтах, мог быть горизонтальный нейтральный ветер, величина которого в ночное время может достигать 200 м/с [8]. Для проверки этого предположения далее будут сопоставлены полученные в работе [7] экспериментальные данные об ориентации поперечной анизотропии Ψ_A с теоретическими расчетами направления горизонтального ветра модели HWM07 [9, 10]. Экспериментальные данные были получены тремя наземными станциями, расположенными в г. Острогожск (50.87°N, 39.06°E), г. Ростов-на-Дону (47.21°N, 39.70°E) и г. Сочи (43.58°N, 39.77°E), входящими в состав радиотомографической установки ПГИ КНЦ РАН.

Результаты

На примерах сопоставления данных спутникового радиозондирования среднеширотной F-области ионосферы с теоретическими расчетами горизонтального ветра (модель HWM07) покажем, что при различных геофизических условиях мелкомасштабные неоднородности вытягиваются вдоль направления ветра. При этом в графике экспериментальной кривой дисперсии амплитуды наблюдаются один или несколько максимумов как показатель стационарной или нестационарной картины векторов ветра.

Аналогичная ситуация наблюдалась в высокоширотной ионосфере при сопоставлении данных спутникового радиозондирования с данными радаров SuperDARN (рис. 1).

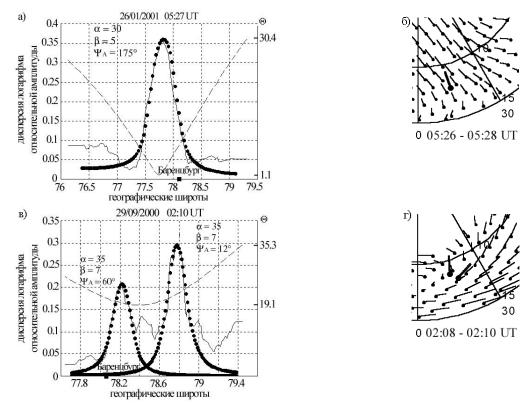


Рисунок 1 – a, a – экспериментальные (сплошная тонкая кривая) максимумы в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды и их аппроксимация теоретическими кривыми (зачерненные кружки) с указанием параметров α , β и $\Psi_{\rm A}$, с которыми достигается наилучшая аппроксимация. Пунктиром показан график значений углов между перемещающимся спутником и магнитным полем в точке наблюдения с указанием минимального ($\Theta_{\rm min}$) и максимального ($\Theta_{\rm max}$) значений;

 $\pmb{\delta}$, \pmb{c} — ионосферная конвекция по данным SuperDARN (тонкие векторы с точкой в начале вектора) и ориентация поперечной анизотропии $\Psi_{\rm A}$ (толстый вектор с началом в центре области регистрации неоднородностей). Система координат — географическая (долгота/коширота).

В работе [6] было показано, что как при стационарной (рис. 1 а, б), так и при нестационарной (рис. 1 в, г) картине ионосферной конвекции в F-области мелкомасштабные неоднородности вытягивались вдоль направления дрейфа плазмы. Метод определения параметров α, β и Ψ_A подробно изложен в работе [2]. Здесь кратко остановимся на основных моментах. Во-первых, ширина аппроксимирующего теоретического максимума (рис. 1а, в) зависит от величин а и в. В высоких широтах ни один экспериментальный максимум невозможно было аппроксимировать при β=1, т.е. моделью изотропных неоднородностей. В примере на рис. 1 а,в β=5 и β=7. Таким образом, высокоширотные неоднородности вытянуты в некотором направлении поперек геомагнитного поля. Во-вторых, по пространственному положению аппроксимирующего теоретического максимума можно определить направление этой поперечной вытянутости, называемой «ориентация поперечной анизотропии» и обозначаемой Ψ_{A} . Ориентация поперечной анизотропии Ψ_{A} измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север по часовой стрелке. Так как значение дисперсии амплитуды не изменяется при изменении угла на 180°, то при необходимости к значению Ψ_A можно прибавить 180°. В примере на рис. 1 а,в Ψ_A =175°, Ψ_A =60° и Ψ_A =12°. Эти величины были сопоставлены с направлением дрейфа ионосферной плазмы по данным SuperDARN (рис. 1 б,г) и было получено хорошее согласие между ними. В первом случае (рис. 1 а,б) единичный максимум свидетельствовал о постоянстве параметров неоднородностей, обусловленных постоянством направления векторов дрейфа плазмы. Во втором случае (рис. 1 в,г) два максимума свидетельствовали о непостоянстве параметров неоднородностей, вызванных изменением направления дрейфа.

Анализ данных радиозондирования среднеширотной ионосферы показал, что в экспериментальных графиках дисперсии логарифма относительной амплитуды наблюдаются максимумы по высоте и форме аналогичные высокоширотным (рис. 2).

Аппроксимация экспериментальных максимумов показала, что среднеширотные неоднородности анизотропны, как и высокоширотные, поскольку ни один максимум не удалось аппроксимировать при β =1, т.е. моделью изотропных неоднородностей. В примере на рис. 2 а,в β =8 и β =18. Таким образом,

среднеширотные неоднородности вытянуты в некотором направлении поперек геомагнитного поля. Сопоставление с моделью HWM07 показало хорошее согласие между ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A и направлением горизонтального нейтрального ветра Ψ_W . Среди экспериментальных данных были случаи присутствия одного (рис. 2a) или нескольких (рис. 2 в) максимумов в графике дисперсии. Выше было замечено, что наличие нескольких максимумов является признаком изменения направления дрейфа плазмы. Очевидно, для среднеширотной ионосферы подобное явление служит признаком изменения направления ветра.

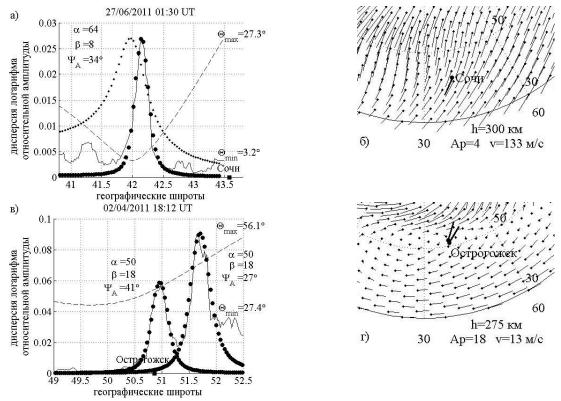


Рисунок 2 – *а, в* – экспериментальные (сплошная тонкая кривая) максимумы в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды и их аппроксимация теоретическими кривыми в предположении изотропных неоднородностей (рисунок «а», β =1, точки) и анизотропных (рисунки «а» и «в», β >1, зачерненные кружки);

 $\pmb{\delta}$, \pmb{z} — распределение векторов горизонтального ветра модели HWM07 (тонкие векторы с точкой в начале вектора) и ориентация поперечной анизотропии $\Psi_{\rm A}$ неоднородностей (толстый вектор с началом в центре области регистрации неоднородностей). Система координат — географическая.

На рис. 3 приведены результаты численного сопоставления экспериментальных и теоретических данных, полученные в независимых экспериментах по радиопросвечиванию среднеширотной (а) и высокоширотной (б) ионосферы.

Вычисленные значения различий $\Delta\Psi$ сгруппированы по интервалам с шагом 20° . По оси ординат показано количество регистраций, значения которых попали в данный интервал. Положительные значения гистограмм показывают, что величина Ψ_A была больше величины Ψ_W и Ψ_{SD} соответственно. Отрицательные значения показывают обратное. Очевидно, что в обеих гистограммах наибольшее число измерений отвечает случаю, когда величина $\Delta\Psi$ имеет значения, не превышающие $\pm 20^{\circ}$. Из этого можно заключить, что в средних широтах поперечная анизотропия мелкомасштабных неоднородностей возникает под воздействием горизонтального нейтрального ветра, подобно тому, что в высоких широтах она возникает в результате ионосферной конвекции.

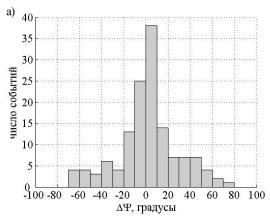
Заключение

Методом радиозондирования исследованы естественные мелкомасштабные неоднородности (с размерами от сотен метров до первых километров) электронной плотности в F-области среднеширотной ионосферы. Показано, что, как и в высоких широтах, среднеширотные неоднородности поперечно-анизотропны. Определены параметры анизотропии: α , β и Ψ_A . Численно они варьируют в следующих интервалах: $\alpha = 15 \div 165$; $\beta = 2 \div 40$; $\Psi_A = 1^\circ \div 178^\circ$. Величины осей неоднородностей определяются выражением $1 < \beta < \alpha$ и

соотношение β : α варьирует от 1:2 до 1:20, в большинстве случаев составляя 1:7, что наблюдалось в высоких широтах.

По результатам численного сопоставления между ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A и направлением горизонтального ветра (модель HWM07) установлено, что в средних широтах мелкомасштабные неоднородности вытянуты вдоль направления горизонтального ветра подобно тому, как в высоких широтах они вытягиваются вдоль направления дрейфа плазмы.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников лаборатории радиопросвечивания Полярного геофизического института за проведение экспериментальных работ. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-05-01024 А и № 15-05-02437 А.



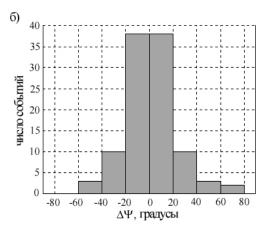


Рисунок 3 – a – гистограмма различий между ориентацией поперечной анизотропии $\Psi_{\rm A}$ и направлением горизонтального ветра $\Psi_{\rm W}$, рассчитанным по модели HWM07, для 161 случая в период с июля 2008 г по март 2012 г;

 δ - гистограмма различий между ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A и направлением дрейфа плазмы Ψ_{SD} , полученном радарами SuperDARN, для 104 случаев в период с сентября 2000 г по март 2006 г.

- 1. Livingston R.C., Rino C.L., Owen J., Tsunoda R.T. The anisotropy of high-latitude nighttime F region irregularities // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. № A12. P. 10519 10526.
- 2. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., Nygren T. Anisotropy of ionospheric irregularities determined from the amplitude of satellite signals at a single receiver // Ann. Geophysicae. 1999. V. 17. P. 508 518.
- 3. Козлова М.О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в F-области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов: Дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29. М., 2002. 120 с.
- 4. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., Evstafiev O.V., Nygren T., Rietveld M. T., Brekke A. Comparison of the orientation of small scale electron density irregularities and F region plasma flow direction // Ann. Geophysicae. 2000. V. 18. P. 918 926.
- 5. Tereshchenko E.D., Romanova N.Yu., Koustov A.V. Orientation of the cross-field anisotropy of small-scale ionospheric irregularities and direction of plasma convection // Ann. Geophysicae. 2005. V. 23. P. 1227 1237.
- 6. Tereshchenko E.D., Romanova N.Yu., Koustov A.V. VHF scintillations, orientation of the anisotropy of F-region irregularities and direction of plasma convection in the polar cap // Ann. Geophysicae. 2008. V.26. P. 1725-1730.
- 7. Романова Н.Ю. Определение параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Proc. XXXVIII Apatity Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". 2015. P. 157-160.
- 8. Ишанов С.А., Клевцур С.В., Латышев К.С. Эффекты многомерности в теоретических моделях среднеширотной области F ионосферы // Вестник Балтийского федерального университета им. И.Канта. 2011. №10. С. 33-39.
- 9. Drob D.P. et al. An Empirical Model of the Earth's Horizontal Wind Fields: HWM07 // J. Geophys Res. 2008. V.113. doi:10.1029/2008JA013668.
- 10. Emmert J.T. et al. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds // J. Geophys Res. 2008. V.113. doi:10.1029/2008JA013541.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 г. НА УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СНЧ ВОЛН НА ВЫСОКОШИРОТНОЙ ТРАССЕ

Е.Д. Терещенко, А.Е. Сидоренко, В.Ф. Григорьев (ФГБНУ «Полярный геофизический институт», Мурманск, Россия) anton@pgi.ru

Аннотация. В работе приведены оценки вариаций параметров, определяющих распространение СНЧ волн в волноводе, наблюдавшиеся во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. На трассе Кольский пов-арх. Шпицберген были зарегистрированы изменения амплитуды искусственного СНЧ сигнала, соответствующие изменениям освещенности при прохождении затмения. Показано, что влияние затмения на распространение СНЧ волн на высокоширотной трассе связано с изменением эффективной высоты отражения на высотах D-области ионосферы. Результаты демонстрируют возможность применения искусственных СНЧ сигналов для контроля состояния нижней ионосферы. Наблюдение эффекта затмения в СНЧ диапазоне с применением искусственного источника радиоизлучения выполнено впервые.

Abstract. We estimate the changes of ELF propagation parameters during the solar eclipse of March 20, 2015. Amplitude variations of EM field of ground based artificial source were observed on the obscured path Kola Peninsula – Barentsburg. Ionospheric reflection height located in D-region characterizes the average electron density profile of the bottom ionosphere. The results show the active ELF methods opportunities in the lower ionosphere sounding. The effect of solar eclipse on ELF propagation when the entire path was obscured has been observed for the first time.

Введение

Радиофизические исследования эффектов, вызываемых в ионосфере в результате прохождения лунной тени во время солнечных затмений активно проводятся уже несколько десятилетий [1, 2]. Значительная часть экспериментальных работ в этом направлении использует данные о возникающих амплитудно-фазовых вариациях радиоволн СДВ диапазона, в основном отражающих реакцию D-области ионосферы. Одним из наиболее ярко регистрируемых эффектов является увеличение эффективной высоты отражения сигналов от ионосферы. При использовании для таких исследований радиоволн СНЧ диапазона, их одномодовый характер распространения мог бы являться преимуществом, однако, крайне ограниченные возможности эффективной генерации искусственных СНЧ волн и отсутствие достаточно мощных источников, обычно не позволяют выполнять такие исследования в районах наблюдения солнечных затмений. Исключением является полное солнечное затмение 20 марта 2015 г., наблюдавшееся в арктической области, близкой к Кольскому п-ову, где расположена мощная СНЧ радиоустановка. В область частичного затмения с максимальной фазой не менее 0.7 попала значительная часть Северо-Запада России. Ниже представлены первые результаты наблюдений эффекта затмения в нижней ионосфере на радиотрассе Кольский п-ов – арх. Шпицберген и его влияние на условия распространения искусственных СНЧ сигналов на частоте 82 Гц.

Описание теоретической модели

Характер распространения СНЧ волн в волноводе Земля-ионосфера определяется комплексным синусом угла падения S_0 , вещественная часть описывает фазовую скорость соотношением $\operatorname{Re} S_0 = c/v$, а мнимая – затухание волны с расстоянием, выражаемое коэффициентом $\alpha = 0.182 f \operatorname{Im} S_0$. Точное аналитическое выражение для S_0 известно в классической модели волновода с резкой ионосферной границей, но если ионосфера рассматривается как неоднородная среда, то для нахождения S_0 используются приближенные метолы.

В одном из простейших подходов высотный профиль проводимости в D-области ионосферы (70-90 км) для СНЧ частот выше 50-70 Гц описывается экспоненциальным законом [3]:

$$\sigma(z) = \sigma_0 \exp[(z - H)/\beta]. \tag{1}$$

В этом случае можно воспользоваться приближенным способом расчета [4], связывающим параметры экспоненциальной зависимости (3) и постоянную распространения S_0 соотношением

$$S_0^2 \approx (h_1 + i\pi\beta/2)/(h_0 - i\pi\beta/2),$$
 (2)

где $h_0 = H - \beta \ln[\sigma_0/(2\pi\varepsilon_0 f)]$, $h_1 = h_0 + 2\beta \ln[c/(4\pi\beta f)]$ – характеристические высоты в ионосфере (км), c – скорость света (км/с), f – частота волны (Гц).

Экспериментальные и модельные данные показывают, что масштаб высоты β проводимости дневного D-слоя на высотах выше 60 км обычно находится в пределах 3-3.3. Ориентируясь на [3], зададим $\sigma_0 = 2.2 \cdot 10^{-6}$ См/м. Так как для контролируемого СНЧ источника геометрия задачи и коэффициент возбуждения известны, выражение (2) устанавливает связь амплитуды поля, создаваемого источником, с профилем проводимости ионосферы на высотах 70-90 км (1). Варьируя значения H и β так, чтобы минимизировать невязку расчетных амплитуд поля горизонтального электрического диполя [5] с измеренными в эксперименте, можно определить примерное поведение эффективных параметров волновода во время затмения, в частности, эффективную высоту отражения h_0 .

Неоднократные наблюдения во время солнечных затмений в СДВ диапазоне показали, что наиболее существенный эффект, оказываемый во время затмения на распространение радиоволн, заключается в вариации эффективной высоты отражения от ионосферы, которая в дневных условиях находится на высотах D-слоя, как и для волн СНЧ диапазона. Высота отражения непосредственно связана с параметрами высотного профиля проводимости, следовательно, анализ амплитудных измерений дает возможность контролировать состояние нижней ионосферы на высотах менее 100 км и исследовать свойства D-области, усредняемые вдоль трасс распространения радиоволн.



Рисунок 1. - Карта-схема района измерений

Описание эксперимента

Источник сигнала, мощная СНЧ радиоустановка, располагался на Кольском п-ове [6]. Измерения поля выполнялись в обсерватории ПГИ в п. Баренцбург (арх. Шпицберген) (рис. 1). Для регистрации излучаемого монохроматического сигнала на частоте 82 Гц использовался 3-компонентный индукционный магнитометр с цифровой системой сбора данных с частотой дискретизации 512 Гц.

Полное солнечное затмение 20 марта 2015 г. наблюдалось в северных районах Атлантики и в Арктике, в том числе, в пункте измерений на арх. Шпицберген. Северо-Запад России попал в зону частной фазы затмения. Трасса распространения радиоволн Кольский п-ов — Шпицберген во время затмения покрывалась тенью целиком и практически одновременно (табл. 1). Протяженность трассы — 1200 км, угол с осью диполя — 118°.

Таблица	 Характери 	тики солнечного зат	мения 20 марта 2015 г.
---------	-------------------------------	---------------------	------------------------

Пинист	Время затмения на уровне моря, UT			Максимальная
Пункт	Начало	Максимум	Окончание	фаза, %
СНЧ радиоустановка	09:14	10:18	11:22	86.9
обс. Баренцбург	09:11	10:10-10:12	11:12	100

Результаты измерений и расчетов

Графики на рис. 2 показывают исходные данные измерений — поведение амплитуды *Н*-компоненты магнитного поля на частоте 82 Гц и найденную по ним временную зависимость эффективной высоты отражения волн от ионосферы (3) в период затмения при относительной погрешности измерений не более 5%. Вертикальными линиями здесь и далее обозначены моменты начала, максимума и окончания затмения в обсерватории Баренцбург. Пунктиром на графиках показан результат сглаживания исходных данных.

Временной ход высоты отражения от ионосферы в период затмения близок к вариациям положения основания ионосферы в результате реакции на изменения потока солнечного излучения. Высота отражения в максимуме затмения приближается к обычным ночным значениям.

Аналогичные по характеру, но менее существенные по величине, вариации отношения c/v находились в пределах 1.15-1.20, а коэффициента затухания α – в пределах 0.8-1.2 дБ/Мм, что также близко к переходу к ночным уровням. Заметим, к тому же, что в выражении для амплитуды поля [5] эти вариации частично компенсируют друг друга.

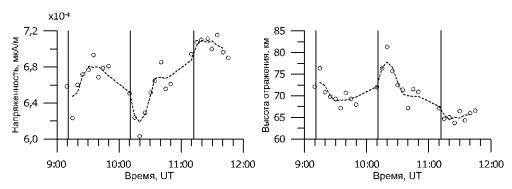


Рисунок 2. Измеренные амплитуды Н-компоненты поля и расчетный ход высоты отражения

Обсуждение результатов

В целом, наблюдаемые параметры распространения c/v, α и эффективная высота волновода одновременно достигали своих экстремальных значений, близких к типичным ночным [5] с задержкой 8-10 минут относительно наступления максимальной фазы затмения. Величина этого смещения характеризует эффективную рекомбинацию ионов на рассматриваемых высотах [7]. Возрастание высоты отражения в максимуме составило около 10 км.

Используя выражение (1), также можно оценить изменения электронной концентрации на высотах 70-90 км во время затмения относительно начального уровня N_0 (рис. 3).

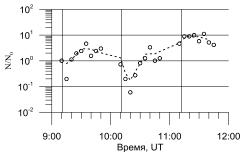


Рисунок 3. Относительные вариации концентрации электронов на высоте 70-90 км (расчет)

Видно, что наибольшее падение концентрации вблизи максимума затмения достигает примерно двух порядков относительно обычного дневного уровня. Приведенный график позволяет в дальнейшем проанализировать поведение производной $d(N/N_0)/dt$ и получить данные о процессах ионизации и рекомбинации. Более подробное рассмотрение этих вопросов затрагивает физику D-области авроральной ионосферы и требует отдельного исследования.

Заключение

В работе были представлены оценки влияния солнечного затмения 20 марта 2015 г. на распространение искусственных СНЧ сигналов в области высоких широт, обусловленные возникающими изменениями электронной концентрации в D-слое ионосферы. Обнаружены вариации амплитуды сигнала величиной 10-15%, по характеру близкие к изменениям солнечной освещенности на трассе. Установлено, что эффективная высота отражения СНЧ волн выросла примерно на 10 км, достигнув максимального значения через 8-10 минут после наступления полной фазы затмения в обс. Баренцбург. Фазовая скорость и коэффициент затухания также испытывали сходные, но менее значимые вариации.

С точки зрения применения волн данного диапазона для осуществления дальней связи важно отметить, что проведенные наблюдения подтвердили высокую устойчивость СНЧ полей к крупномасштабным и быстротекущим ионосферным возмущениям на трассе.

Дальнейший анализ полученных данных должен быть связан с анализом поведения электронной концентрации в D-области по установленным вариациям параметров H и β . Это позволит применить известные методы исследований, основанные на решении уравнения баланса ионизации [7] и таким образом использовать сигналы контролируемой СНЧ радиоустановки непосредственно для исследований особенностей процессов ионообразования и рекомбинации в нижней ионосфере. Целесообразно в дальнейшем продолжить исследования и во время других существенных возмущений в нижней ионосфере, например, возникающих в результате солнечных рентгеновских вспышек [8]. Интерес представляет также сопоставление одновременных результатов СНЧ наблюдений с данными других методов исследования нижней ионосферы.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-05-02437 A).

- 1. Crary J. H., Schneible D.E. Effect of the Eclipse of 20 July 1963 on VLF Signals Propagating Over Short Paths // Proc. of NBS. Radio Sci. 1965. V. 69D. № 7. P. 947–957.
- 2. Черногор Л.Ф. Вариации амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. №1. С. 100-110.
- 3. Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. NBS Tech. Note 300, 1964.
- 4. Greifinger C., Greifinger P. Approximate method for determining ELF eigenvalues in the earth-ionosphere waveguide // Radio Sci. 1978. V. 13. №5. P. 831-837.
- 5. Bannister P.R., Simplified formulas for ELF propagation at shorter distances // Radio Sci. 1986. V. 21, №3, P. 529-537.
- 6. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А, Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов АН., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ диапазона. // ДАН. 1994. Т. 338, №1, С. 106-109.
- 7. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.
- 8. Basak T., Chakrabarti S.K. Effective recombination coefficient and solar zenith angle effects on low-latitude Dregion ionosphere evaluated from VLF signal amplitude and its time delay during X-ray solar flares // Astrophys Space Sci. 2013. V. 348. P. 315–326.

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ СПЕКТРА ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАГРЕВНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Е.Д. Терещенко, Р.Ю. Юрик

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», Мурманск, Россия e-mail: roman.yurik@pgi.ru

Аннотация. В работе представлены результаты коротковолновых интерферометрических измерений искусственного радиоизлучения ионосферы в высоких широтах. Исследование проведено по измерениям искусственного радиоизлучения ионосферы, выполнявшихся в ходе экспериментов на высокоширотных коротковолновых нагревных стендах в г. Тромсе (EISCAT) и на арх. Шпицберген (SPEAR). Результаты получены при воздействии на ионосферу нагревными импульсами с различным коэффициентом заполнения импульсной последовательности излучения, что позволило исследовать изменение формы спектров искусственного радиоизлучения при различных режимах воздействия на ионосферу.

Abstract. The results of HF interferometric measurements of stimulated electromagnetic emission at high latitudes are presented. The study was performed by observations of the stimulated electromagnetic emission during the experiments on high-latitude heating facilities in Tromsø (EISCAT) and Spitsbergen archipelago (SPEAR). The results were obtained under the influence of the ionosphere by heating pulses with different duty cycle, which allowed to investigate the changes in the spectra form of stimulated electromagnetic emission at different modes of the ionosphere heating.

Введение

Искусственное радиоизлучение ионосферы, как слабое шумоподобное излучение, генерируемое в результате воздействия на ионосферу мощной электромагнитной волны, было экспериментально открыто в 1981 году на нагревной установке EISCAT (*Thidé et al.*, 1982).

На протяжение последующих лет искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) исследовалось с применением коротковолновых нагревных установок, расположенных в различных широтах и долготных секторах. Для регистрации излучения чаще всего использовались амплитудные измерения и применялась широкополосная регистрирующая аппаратура коротковолнового диапазона с высоким динамическим диапазоном. Были подробно исследованы морфология искусственного радиоизлучения ионосферы (Leyser, 2001) и его динамика (Frolov et al., 1997; Sergeev et al., 1998).

Изучение динамики ИРИ выявило двойственную природу этого излучения и заставило разделить наблюдаемые составляющие спектра на «быстрые» и «медленные» (см. например систематизацию в Leyser, 2001). К «быстрым» (пондеромоторным) компонентам были отнесены спектральные особенности искусственного излучения, которые генерируются в результате возбуждения электростатических плазменных колебаний на высотах близких к высоте отражения волны накачки. Спектральные компоненты, возникающие в результате структуризации ионосферы и образования в ней плазменных неоднородностей, вытянутых вдоль силовых линий геомагнитного поля на высотах вблизи верхнего гибридного резонанса, получили название «медленных» (тепловых) спектральных компонент ИРИ иногда называемых компонентами стационарного спектра.

Несмотря на широкое исследование амплитудных и динамических характеристик искусственного излучения и применения его для диагностики нелинейных процессов в ионосферной плазме, интерферометрические (Isham et al., 2005; Tereshchenko et al., 2006) и поляризационные исследования (Carozzi et al., 2001; Tereshchenko et al., 2015) показали более сложную природу этого излучения и позволили открыть новое направление в исследованиях искусственно модифицированной ионосферы.

В настоящей работе, на основе данных экспериментов, проводившихся Полярным геофизическим институтом на нагревных установках EISCAT, расположенной в субавроральной зоне и SPEAR, находящейся в области полярной шапки, исследуется форма спектров искусственного радиоизлучения ионосферы при различной длительности нагревных импульсов.

Описание экспериментов

Эксперименты по искусственной модификации ионосферы, результаты которых использовались в данной работе, проводились на субавроральной нагревной установке EISCAT, расположенной вблизи города

Тромсе (Норвегия, 69.6° с.ш., 19.2° в.д., $I = 78^{\circ}$) с 26 сентября по 14 октября 2004 г. и на полярной нагревной установке SPEAR вблизи города Лонгйирбиен на архипелаге Шпицберген (78.9° с.ш., 16.4° в.д., $I = 82^{\circ}$) с 11 по 18 октября 2010 г.

Нагревная установка EISCAT 6 октября 2004 года в интервале времени с 15:30 UT до 15:46 UT работала в режиме излучения импульсов длительностями 0.96 мс, 192 мс, 384 мс и 1536 мс. При этом цикл излучения импульсов составлял 4 минуты для каждого из четырех направлений излучения: 0° (в географический зенит - вертикально вверх), 7° к югу от вертикали, 14° к югу от вертикали и 21° к югу от вертикали. Нагревная установка излучала на частоте 4040 кГц используя 12 передатчиков установки, подключенных к фазированной антенной решетке № 2. При таком режиме работы нагервной установки эффективно излучаемая мощность составляла около 164 МВт с углом раствора главного лепестка диаграммы направленности 14° по уровню -3 дБ.

На нагревной установке SPEAR эксперименты выполнялись в период с 11 по 18 октября 2010 г. Излучение фазированной антенной решетки в ходе экспериментов, результаты которых использовались для анализа, направлялось вдоль геомагнитного меридиана (т.е. отклонялось к югу от вертикали на 8° в плоскости геомагнитного меридиана). Эффективная излучаемая мощность нагревной установки составляла 12 МВт при этом из-за особенностей фазированной антенной решетки диаграмма направленности установки по уровню мощности -3 дБ представляет собой эллипс, ширина которого на частоте 4.45 МГц составляла 14° вдоль малой оси и 21° вдоль большой оси эллипса.

В обоих случаях для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы применялся коротковолновый интерферометр ПГИ, установленный на расстояниях около 12 км в ходе эксперимента на установке EISCAT и 30 км - на установке SPEAR. Регистрация велась 4-х секундными сериями в течение всего цикла работы нагревной установки при каждом рабочем режиме.

Дальнейший анализ данных проводился методом периодограмм со сглаживанием данных и применением окон Блэкмана — Харриса. По результатам проводилось спектральное оценивание многоканальных процессов (Марпл.-мл., 1990) с расчетом матрицы и функции когерентности для трехканальных процессов. Для последующего анализа спектральных составляющих ИРИ по функции когерентности рассчитывались квадрат модуля и фазовый спектр когерентности, позволившие определить как спектральные характеристики отдельных особенностей спектра ИРИ, так и направление прихода излучения.

Результаты

На рис. 1 приведены спектральные мощности наблюдаемого искусственного излучения ионосферы в ходе эксперимента на нагревной установке EISCAT.

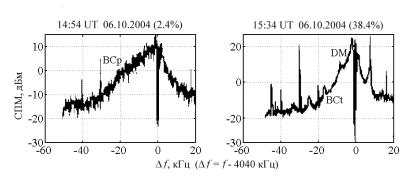


Рисунок 1. Спектральная плотность мощности искусственного радиоизлучения ионосферы во время экспериментов на нагревной установке EISCAT 6 октября 2004 г.

На рисунке показан спектр ИРИ в интервале отстроек по частое от -50 к Γ ц до 20 к Γ ц от частоты излучения установки (4040 к Γ ц). Слева приведен спектр при излучении установкой импульсов длительностью 96 мс (коэффициент заполнения импульсной последовательности излучения составляет 2.4 % от рабочего цикла), а справа - при излучении импульсов длительность 1536 мс (коэффициент заполнения - 38.4 %). В обоих случаях центральная часть спектра ($\Delta f = 0$) подавлена рижекторным фильтром для исключения отраженной от ионосферы волны накачки и расширения динамического диапазона приемной системы.

На рисунке обозначены некоторые характерные особенности спектра ИРИ позволяющие определить его форму. Так, слева на рисунке виден сигнал широкополосной составляющей излучения в отрицательной области отстроек по частоте от волны накачки (ВСр) характерный для пондеромоторных спектров. Составляющая спектра имеет асимметричную форму и занимает полосу частот от -40 к Γ ц до 17 к Γ ц. Максимальные значения ВСр находятся на частоте примерно -5 к Γ ц \div -7 к Γ ц и, примерно, на 30 д Γ м превышает уровень шума.

В спектре ИРИ на рисунке 1 справа широкополосная составляющая тепловой формы спектра (BCt) занимает более узкую область (от -30 кГц до 5 кГц) и имеет более отчетливую асимметрию. Кроме широкополосной составляющей, в спектре виден главный спектральный максимум в области отрицательных отстроек по частоте (DM), который в пондеромоторных формах спектра не наблюдается.

Сравнивая две формы спектра на рис. 1 следует отметить, что при коэффициенте заполнения приближающемся к 40% в спектре ИРИ начинают наблюдаться составляющие характерные для стационарных (тепловых) форм.

На рис. 2 в такой же форме, что и на рис. 1 приведены результаты наблюдения ИРИ в ходе эксперимента на нагревной установке SPEAR.

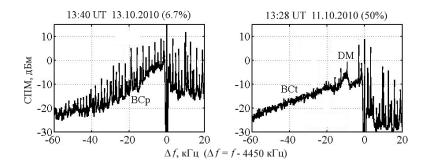


Рисунок 2. Спектральная плотность мощности искусственного радиоизлучения ионосферы во время экспериментов на нагревной установке SPEAR 11и 13 октября 2010 г.

Как и в предыдущем случае при пондеромоторной форме спектра отчетливо наблюдается сигнал ВСр, а в случае более высокого коэффициента заполнения - ВСt и DM. При этом, при более высоком коэффициенте заполнения главный спектральный максимум отчетливо различается на фоне более широкого в частотной области ВСt.

При тепловой форме спектра ИРИ широкополосный сигнал в области отрицательных отстроек по частоте обладает более ярко выраженной асимметрией. Так, справа на рис. 2 излучение BCt в области положительных отстроек по частоте не наблюдается.

Следует отметить, что, анализируя углы прихода искусственного радиоизлучения соответствующего различным формам спектра, можно увидеть, что при проекции углов на один высотный уровень положение источников пондеромоторных и тепловых составляющих спектра не совпадает.

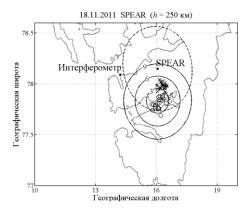


Рисунок 3. Проекция углов прихода сигнала ИРИ на ионосферный уровень по данным наблюдений 18 ноября 2010 г. на установке SPEAR (Терещенко и др., 2012)

На рис. З в географической системе координат показана проекция измеренных углов прихода, определенных по данным полученным в ходе эксперимента на нагревной установке SPEAR 18 ноября 2011 г., на ионосферный уровень 250 км (*Терещенко и др.*, 2012). Перекрестиями отмечены положения источника понедромоторной формы спектра ИРИ, а кругами - теплового. Из рисунка видно, что положение источника генерации тепловых составляющих ИРИ локализовано вблизи магнитного зенита (сплошные изолинии на рисунке указывают угол между излучением и касательной к геомагнитному полю), в то время как источник пондеромоторных составляющих находится вблизи пика ракурсного угла.

Заключение

При длительности нагревных импульсов менее 10% от цикла наблюдаются характерные пондермоторные составляющие спектра, что говорит об отсутствии или незначительности тепловых эффектов искусственной модификации ионосферы.

При длительности излучения 50% от цикла наблюдаемые спектры ИРИ трансформируются в стационарные тепловые спектры, что говорит о структурировании ионосферной плазмы и генерации искусственных ионосферных неоднородностей метровых масштабов.

Положение области генерации стационарных компонент ИРИ не совпадает с областью генерации «быстрых» компонент.

Различия в характерных временах возбуждения искусственного радиоизлучения ионосферы в высоких широтах может объясняться как более низкой мощностью нагревной установки SPEAR, так и выносом плазмы из возмущенной области.

- 1. Thidé, B., Kopka, H., and Stubbe, P. Observations of Stimulated Scattering of a Strong High Frequency Radio Wave in the Ionosphere // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49, P. 1561–1564.
- 2. Leyser, T. B. Stimulated electromagnetic emissions by high frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma // Space Sci. Rev. 2001. V. 98, P. 223–328.
- 3. Frolov, V. L., Komrakov, G. P., Sergeev, E. N., Thide, B., Waldenvik, M., and Veszelei, E. Results of the Experimental Study of Narrow Continuum Features in Stimulated Ionospheric Emission Spectra // Radiophys. Quantum Electron. 1997. 40, 731–744.
- 4. Sergeev, E. N., Frolov, V. L., Boiko, G. N., and Komrakov, G. P. Results of Investigation of the Langmuir and Upper-Hybrid Plasma Turbulence Evolution by Means of Stimulated Ionospheric Emission // Radiophys. Quantum Electron. 1998. 41, 206–228.
- 5. Tereshchenko E. D., Yurik R. Yu., Khudukon B. Z., Rietveld M. T., Isham B., Belyey V., Brekke A., Hagfors T., and Grill M. Directional features of the downshifted peak observed in HF-induced stimulated electromagnetic emission spectra obtained using an interferometer // Ann. Geophysicae. 2006. V. 24, P. 1819-1827.
- 6. Carozzi T.D., Thide B., Leyser T.B., Komrakov G.P., Frolov V.L., Grach S.M., and Sergeev E.N. Full polarimetry measurements of stimulated electromagnetic emissions: First results. // J. Geophys. Res., V.106(A10), P.21395-21408. 2001.
- 7. Tereshchenko E. D., Yurik R. Y., Baddeley L. Stimulated electromagnetic emission polarization under different polarizations of pump waves // Ann. Geophys., 33, 295–300, 2015.
- 8. Isham B., Hagfors T., Khudukon B., Yurik Yu. R., Tereshchenko E. D., Rietveld M. T., Belyey V., Grill M., La Hoz C., Brekke A., and Heinselman C. An interferometer experiment to explore the aspect angle dependence of stimulated electromagnetic emission spectra // Ann. Geophysicae. 2005.
- 8. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. М.: Мир, 1990 584 с.
- 9. Терещенко Е.Д., Юрик Р.Ю., Бэддли Л. Наблюдение искусственного радиоизлучения ионосферы в высоких широтах при различных режимах работы нагревного стенда // Вестник КНЦ РАН. № 2, С.17 22, 2012.

ЗОНДИРОВАНИЕ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА С НИС «ПРОФЕССОР МОЛЧАНОВ» И «АКАДЕМИК ФЕДОРОВ» ПО СИГНАЛАМ КА ГЛОНАСС/GPS

В.В. Удриш 1 , В.М. Смирнов 2 , А.В. Тертышников 3 , Я.В. Глухов 3 , Д.С. Ковалев 4 , П.А. Тимофеев 1 , Г.В. Коваленко 1 , А.А. Окатьев 1

¹МО ВС РФ, Москва, Россия ²ФИРЭ РАН, Фрязино, Россия ³ФГБУ «ИПГ», Москва, Россия ⁴САФУ, Архангельск, Россия

Аннотация. Представлены результаты зондирования аврорального овала по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS, полученные в ходе экспериментов по зондированию высокоширотной ионосферы с научно-исследовательских судов «Академик Федоров» и «Профессор Молчанов».

Abstract. The results of the auroral oval sounding by the signals of GNSS GLONASS/GPS, obtained in the experiments on the high-latitude ionosphere sounding from research vessels "Akademik Fedorov" and "Professor Molchanov" are presented.

Введение

Высокоширотная ионосфера и её авроральные овалы с ионосферной токовой струёй оказывают существенное влияние на качество радиосвязи, позиционирования по сигналам КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), безопасность энергетических, коммуникационных и транспортных систем [1, 2].

Для мониторинга высокоширотной ионосферы используются расположенные на суше и островах станции ионосферного зондирования, сеть магнитных обсерваторий и риометров, визуальные наблюдения за проявлением полярных сияний, системы РЛС, КА дистанционного зондирования Земли [3], радары, сигналы глобальных навигационных спутниковых систем [4]. Наблюдения ионосферы с судов носят экспедиционный характер, фрагментарны и нерегулярны. Тем не менее, зондирование высокоширотной ионосферы, особенно в Арктической зоне, с судов, в том числе ледового класса, реально, так как все они оснащены навигационными приемниками сигналов КА ГНСС.

Схема эксперимента

Для проверки возможности зондирования высокоширотной ионосферы по сигналам КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS с морских судов было проведено несколько экспедиций в 2013-2015 гг. в рамках проекта Арктического плавучего университета (АПУ) Северного (Арктического) федерального университета. В 2014-2015 гг. для экспедиций использовалось научно-исследовательское судно (НИС) «Профессор Молчанов», а в 2013 г. НИС «Академик Федоров». В экспериментах использовался геодезический навигационный приемник «Trimble 5700».

Метод зондирования ионосферы [4], предлагаемый для проведения эксперимента, отрабатывался в зоне действия нагревного стенда "Сура" [7], на Байконуре [8], и стал основой технологии зондирования ионосферы, в которую вошли наработки технологий наклонного зондирования ионосферы, наземного и спутникового радиозондирования ионосферы, зондирования на основе сигналов навигационных спутниковых систем, томографии ионосферы, многочастотного зондирования с геостационарных космических аппаратов (ГКА) [5].

Основное внимание при зондировании уделялось расчету ПЭС в подионосферных точках видимых КА ГНСС. В высоких широтах это может позволить «просвечивать» зоны полярных сияний, аврорального овала, клефта и полярного каспа. Географическое положение приемника определяет возможность зондирования морфологии холодной плазмы ближнего космоса над полярной шапкой Земли.

Для обработки полученных с приемника RINEX-файлов был разработан программно-аппаратный комплекс [9]. Его верификация и валидация проводились при сравнении с данными модели ионосферы IRI-2011 в ходе экспериментов в ФГБУ «ИПГ» (Москва).

Результаты зондирования аврорального овала

Положение аврорального овала проявляется в широтном градиенте ионосферной задержки сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS, проходящих вблизи от маршрута судна. С помощью [9] по данным RINEX-файлов, получаемых с навигационного приемника на судне, рассчитывалось положение наблюдаемых с НИС треков НКА (фактически подионосферных точек). Среди них отбирались треки, которые проходили вблизи меридиана НИС. Вдоль отобранных треков анализировались широтные градиенты изменения ионосферной задержки сигналов НКА GPS.

Пример широтного изменения полного содержания электронов (ПЭС) по широте под нисходящим треком НКА G10 показан на рис. 1. Увеличение ПЭС на широтах 69,5-67,5 градусов в принципе соответствует морфологии аврорального овала в полночь по московскому времени и результатам моделирования положения центральной зоны аврорального овала по [6]. Поэтому можно предположить, что это увеличение и есть проявление аврорального овала.

На б) — фрагменте рис. 1 представлен профиль распределения ионосферной задержки по широте для вечернего нисходящего трека НКА G10 с 19-00 до 22-21 с осреднением оценок $\Pi \$ ОС по предыдущим 5 минутам.

Над средними широтами видно проявление ночного обеднения ионосферы. Аномальное увеличение ионосферной задержки на широтах 69-67 градусов может быть обусловлено ионосферной плазмой аврорального овала, возможностью существования ионосферной токовой струи [10], максимальной широтой надира КА GPS. Разница в положении градиентов ионосферной задержки могла быть обусловлена полуночным (на запад, рис. 1 а)) и предутренним (над НИС, рис. 1 б)) треками НКА.

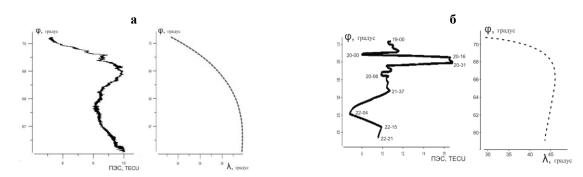


Рисунок 1. Изменение ПЭС по широте.

а) - левый фрагмент) на нисходящем треке НКА G10 (правый фрагмент) в период 0 ч 0 мин 06 с -1 ч 58 мин 13 с 03.08.2014 г.; б) - левый фрагмент с временными метками) на нисходящем треке НКА G01 (правый фрагмент) 03.08.2014 г.

Сложная морфология распределения ионосферной задержки была отмечена к полюсу и над магнитным полюсом Земли. В зоне аврорального овала существенно возрастал поток сбоев выдачи данных на выходе навигационного приемника. ПЭС над магнитным полюсом во время экспериментов было пониженным.

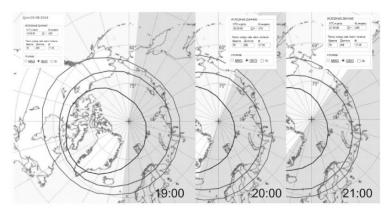


Рисунок 2. Результаты оценивания AL-индекса, положения аврорального овала и магнитного полюса Земли на 19:00, 20:00 и 21:00 мск 03.08.2014 г.

Геомагнитная обстановка во время экспериментов была спокойной. Кр-индекс по данным [11] для 03.08.2014 г. оценивался как 1+. Солнечная активность была низкая. Рассчитанные путем подбора значения AL-индекса (рис. 2) соответствовали данным [12] с расшифровкой формата представления данных в [13],

что позволило использовать в качестве первого приближения положения магнитных полюсов Земли данные по климатической модели аврорального овала, в которой фактически использованы данные наблюдений сети магнитных обсерваторий.

Необходимость совершенствования климатической модели аврорального овала Г.В. Старкова для расчета ПЭС иллюстрируется рис. 3, данные для которых получены с НИС «Академик Федоров» 28.08.2013 г. Здесь представлен график изменения ПЭС вдоль проекции подионосферных точек без осреднения по времени вдоль геомагнитной широты (левая часть рисунка), а также области пересечения подионосферными точками границ аврорального овала, рассчитанных по модели Г.В. Старкова с фактическими значениями АL-индекса. При этом, при пересечении верхней границы овала наблюдается резкое понижение ПЭС на 6 ТЕСU, что можно принять за проявление приполюсной границы аврорального овала.

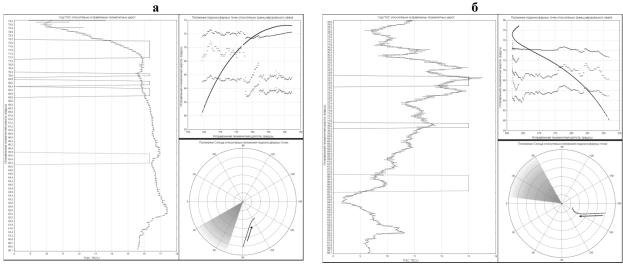


Рисунок 3. Изменение ПЭС вдоль геомагнитной широты подионосферных точек KA GPS: a) G04 07:00 - 10:00 UTC $28.08.2013~\Gamma$; б) G08 12:00 - 16:00 UTC $28.08.2013~\Gamma$.

Движение КА из дневной области ионосферы и повышенная ионизация зоны клефта замаскировала проявление экваториальной границы аврорального овала и границы его диффузного свечения.

Прямоугольниками обозначены пересечения подионосферными точками границ аврорального овала по модели Г.В. Старкова: синий – приполюсная граница, красный – экваториальная граница, зеленый – граница диффузного свечения.

На правом верхнем фрагменте представлено положение подионосферных точек (черная линия) относительно границ аврорального овала по модели Г.В. Старкова.

На правом нижнем фрагменте показано положение подионосферных точек (синяя линия) относительно положения солнца (оранжевый сектор), а также направление движения подионосферных точек (черная стрелка).

Границы аврорального овала на рис. 6 б) смещены севернее границ, рассчитанных по модели Г.В. Старкова, что может быть связано с установленной в расчетах высотой для расчета подионосферных точек.

Приполюсная и экваториальная границы овала характеризуются резким градиентом изменения ПЭС от широты – на 2-3 ТЕСU на 0.5° широты (синяя и красная стрелки на графике). Граница области диффузного свечения характеризуется постепенным увеличением ПЭС вместе с увеличением геомагнитной широты

Возможность зондирования аврорального овала с помощью навигационного приемника сигналов ГНСС определяется его размещением в зоне полярной шапки и аврорального овала Арктики и/или Антарктики, моделированием границ аврорального овала, прогнозом состояния магнитного поля Земли (коврики Бартельса) и солнечного ветра (WSA-ENLIL Solar Wind Prediction и др.).

Заключение

Представлены примеры зондирования положения аврорального овала с помощью геодезического навигационного приемника сигналов ГНСС с НИС «Академик Федоров» и «Профессор Молчанов».

Авроральный овал проявляется в широтном градиенте электронной концентрации, в соответствии с морфологией аврорального овала, в том числе по модели Г.В. Старкова.

Технология зондирования высокоширотной ионосферы и аврорального овала реализуема с труднодоступных высокоширотных станций, в том числе подвижных.

- 1. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. РД 52.88-699-2008.
- 2. Тертышников А.В. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений / http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666
- 3. Тертышников А.В., Лапшин В.Б., Сыроешкин А.В. и др. Магнитные индексы. Учебное пособие. Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
- 4. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информация и космос. 2010. Т. 1. С. 100-105.
- 5. 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.
- 6. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения//Геомагнетизм и аэрономия, 1994, т. 34, № 3. С. 80-86.
- 7. Тертышников А.В., Суровцева И.В., Фролов В.Л., Смирнов В.М. Оценивание восстановленных по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS профилей электронной концентрации в ионосфере / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: ИКИ РАН, 2010. Т. 3. С. 115-119.
- 8. Тертышников А.В. Результаты эксперимента по диагностике состояния ионосферы над Байконуром по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS (http://vestnik.geospace.rw/index.php?id=48)/.
- 9. 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.
- 10. Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения/Физика околоземного космического пространства. Апатиты: ПГИ, 2000.
- 11. http://www.celestrak.com/SpaceData/.
- 12. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp///dstae///wwwtmp/WWW_dstae00032678.dat.
- 13. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/format/aehformat.html.
- 14. Тертышников А.В. и др. Способ определения положения эпицентральной зоны источника и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений. Заявка на изобретение. ФГБУ «ФИПС», Рег. № 2014125712/07(041820) от 25.06.2014.

ОВАЛ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ПРОСТРАНСТВЕННО ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЭС В АРКТИКЕ

С.А. Черноус 1 , И.И. Шагимуратов 2 , М.В. Филатов 1 , М.В. Швец 1 , И.И. Ефишов 2 , Ю.В. Федоренко 1 , И.Б. Иевенко 3 , Н.В. Калитенков 4

Аннотация. Проведено исследование бури 7 января 2015 по наблюдениям полярных сияний и вариаций полного электронного содержания (ПЭС), доказывающее высокую степень связи пространственновременного распределения интенсивности того и другого явления. Проведен предварительный анализ возможности использования модели прогнозирования параметров овала полярных сияний NORUSKA для прогнозирования овала неоднородностей в полярной ионосфере, влияющих на распространение навигационных сигналов высокоорбитальных спутников. Показано, что отказы и погрешности в работе навигационной аппаратуры на различных широтах максимально проявляются в период наиболее интенсивных возмущений в ионосфере Арктики, связанных с полярными сияниями.

Abstract. A study of the storm January 7, 2015 by observations of optical aurora and total electron content (TEC) variations proves a high degree relationship of spatial-time distribution of both phenomena. A preliminary analysis of using auroral oval NORUSKA model to predict irregularities oval of the polar ionosphere, which affect on satellite navigation signals. It is shown that failures and errors in the navigation equipment at different latitudes most manifest in the period of most intense disturbances in the Arctic ionosphere, associated with aurora.

Материалы и методы

В работе использованы оптические наблюдения полярных сияний на станциях Якутск (62.03N 129.73E) [1] и Покер-Флэт, Аляска (65.12N 147.43W) [2]. Данные с этих пунктов представлены кеограммами в авроральных эмиссиях. Одновременные наблюдения вариаций ПЭС (индекс ROTI) в Якутске и на Аляске (станция AB18, 66.71N 162.61W) в конкретном случае позволяют сравнивать временные ряды (суточный ход) развития обеих явлений. Для исследования возможности прогнозирования состояния полярной ионосферы, маркером которого являются полярные сияния, использована модель прогноза сияний NORUSKA [3]. На рис. 1 для характеристики рассматриваемых геофизических событий приведены планетарные (Кр и Dst) и авроральный (АЕ) индексы. Для построения овалов неоднородностей (флуктуаций) ПЭС использовалась методика, описанная в [4].

Результаты и обсуждение

Как следует из данных рис. 1 в рассматриваемые сутки на Земле с 08 до 15 UT происходила изолированная магнитная буря, нашедшая свое отражение в интегрированной картине распределения неоднородностей ПЭС, построенной по данным более, чем сотни станций. На рис. 2 представлены пространственновременные вариации ПЭС для возмущенного дня 7 января 2015 г. и для предшествующих 6.01.2015 и последующего 8.01.2015 суток. Очевидно, что овальное распределение неоднородностей ПЭС 7 января (возмущенные сутки) радикальным образом отличается от аналогичных картин 6 и 8 января (спокойные сутки). Пространственное распределение ионосферных неоднородностей напоминает расширенный овал, и его границы значительно сдвинуты к экватору (особенно в ночной части). В связи с этим представляет значительный интерес рассмотреть особенности временного развития распределения полярных сияний и неоднородностей (флуктуаций) ПЭС по прямым измерениям. Суточный ход вариаций ПЭС с различных спутников по данным обсерваторий на Аляске (АВ18) и в Якутске за 6 и 7 января 2015г. представлен на рис. 3. Из приведенной картины следует, что в спокойный и возмущенный дни разительно отличны вариации ПЭС, определяемые индексом ROTI и экстремальные отклонения во временном ходе этого индекса приходятся на интервал 08-15 UT 7.01.2015 г. Для того, чтобы оценить возможности прогнозирования пространственно-временного распределение полярных сияний по методу NORUSKA в рассмотренные дни, для прогнозирования пространственно-временного распределения неоднородностей (флуктуаций) ПЭС нами были построены картины совместного развития этих явлений в координатах географическая широта мировое время для станций, разнесенных по долготе (рис. 4).

¹Полярный Геофизический Институт, Мурманск, Anamumы (e-mail: chernouss@pgia.ru)

²Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград

³Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск

⁴Мурманский Государственный Технический Университет, Мурманск

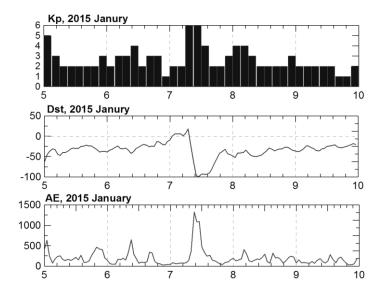


Рисунок 1. Геомагнитные индексы в дни, включающие день магнитной бури 07.01.2015

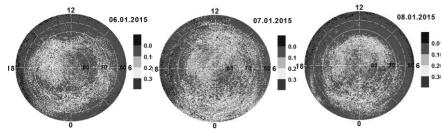


Рисунок 2. Усредненное пространственно - временное распределение неоднородностей ПЭС для дней с различной геомагнитной активностью 6.01.2016, 7.01.2016, 8.01.2016

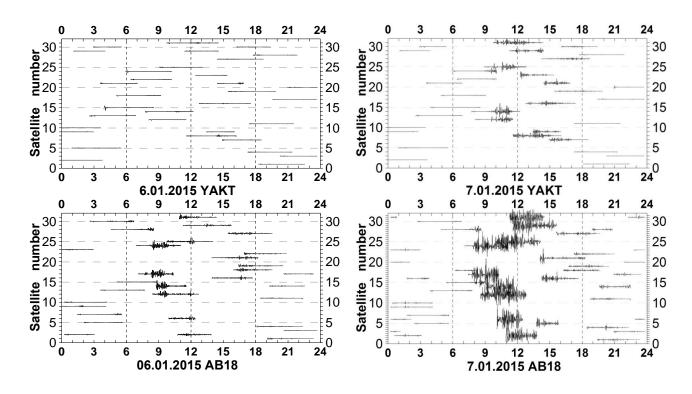


Рисунок 3. Суточный ход вариаций ПЭС с различных спутников по данным обсерваторий на Аляске (AB18) и в Якутске за 6 и 7 января 2015г.

Из приведенных данных вариаций (флуктуаций) ПЭС и полярных сияний следует, что изменение их пространственно-временного положения имеет тенденции к подобию: размеры овала сияний, границы этого овала, степень асимметрии меняются в том же направлении, в каком изменяется пространственно-временная картина флуктуаций ПЭС. Это говорит о возможности использовать имеющиеся результаты прогнозирования полярных сияний для прогноза условий распространения навигационных сигналов в ионосфере. Естественно, что полного совпадения овалов сияний и неоднородностей мы на рис.4 не видим, во-первых, потому, что в данном случае используются не реальные измерения полярных сияний, а данные их прогноза, во-вторых, потому, что овал полярных сияний построен при предположении , что их высота их нижнего края порядка 120 км [5], а «овал» неоднородностей построен для высоты порядка 400 км [4], в третьих, некоторые изменения в расчеты положения обеих овалов могут вносить изменения положения магнитного полюса Земли [6]. Все эти проблемы могут и должны быть исследованы в дальнейших работах.

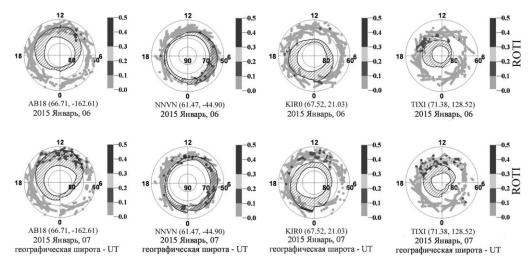


Рисунок 4. Пространственно-временные распределения сияний (черная штриховка) и неоднородностей ПЭС (градации серого) в спокойный день 6.01.2015 и возмущенный 7.01 2015г.

Для демонстрации степени соответствия развития реальных полярных сияний и флуктуаций ПЭС на рис 5 приводятся кеограммы полярных сияний на станциях Покер Флэт и Якутск. Если сопоставить эти записи с записями вариаций ПЭС на рис.3, можно увидеть высокую степень подобия в реальных событиях.

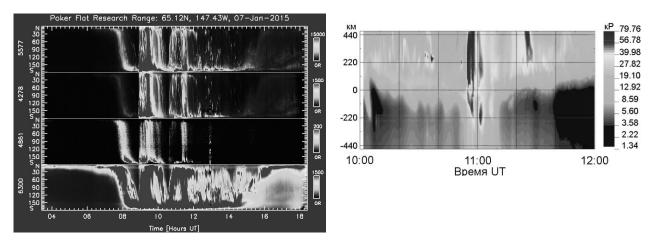


Рисунок 5. Кеограммы в различных эмиссиях в обсерватории Poker Flat (Аляска) и кеограмма в эмиссии 577.7 нм по данным обсерватории Якутск за 7.01.2015 г.

Об этом же говорит рис.6, на котором приводятся данные (в процентах к общему числу) нарушений приема сигналов навигационных спутников на станциях приема, расположенных на различных широтах в период спокойных и возмущенных дней.

Latitud	N day	LL	I	L2=	L2=0.		al
es	of 2015	N	%	N	%	N	%
	006	96	0.33	201	0.68	297	1.01
<=60	007	1062	3.57	850	2.85	1912	6.42
	800	130	0.43	170	0.58	300	1.01
	006	296	0.86	449	1.23	745	2.09
<=65	007	634	1.86	1233	3.64	1867	5.5
	800	314	0.89	399	1.05	713	1.94
	006	374	1.25	419	1.4	793	2.65
<=70	007	1104	3.68	1216	4.09	2320	7.77
	800	254	0.84	337	1.14	591	1.98
	006	104	0.35	204	0.67	308	1.02
<=75	007	160	0.53	398	1.32	558	1.85
	800	126	0.4	211	0.7	337	1.1
	006	422	1.34	819	2.65	1241	3.99
<=80	007	521	1.64	889	2.89	1410	4.53
	800	391	1.24	808	2.27	1199	3.51
	006	55	0.18	96	0.32	151	0.5
<=85	007	44	0.14	95	0.31	139	0.45
	800	41	0.13	98	0.32	139	0.45

LLI-Loss Lock indicator Lack of reading L2 signal

Рисунок 6. Таблица нарушений приема сигналов навигационных спутников (январь 2015 г.).

Заключение

В работе предпринята попытка использования полярных сияний в качестве средства диагностики и прогноза пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС в Арктике. По модельным представлениям и реальным измерениям установлено, что использование модели прогнозирования параметров овала полярных сияний NORUSKA может являться способом прогнозирования овала неоднородностей ПЭС. Целесообразность проведенных исследований подтверждается данными сбоев приема сигналов навигационных спутников.

Благодарности. Работа поддержана грантами РФФИ 14-05-98820 р север-а и 15-45-05090 р восток-а.

- 1. Chernouss S.A., Shagimuratov I.I., Ievenko I.B., Filatov M.V., Efishov I.I., Shvets M.V., Kalitenkov N.V. Aurora as Indicator of the Ionospheric Impact on TransIonospheric Navigation Signals, Proceedings of V Intern. Conf. "Atmosphere, Ionosphere, Safety" (AIS-2016), Kaliningrad, Russia, 2016, pp. 185—191.
- 2. http://optics.gi.alaska.edu/optics/realtime
- 3. 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.
- 4. Shagimuratov I. I., Krankowski A., Efishov I., Cherniak Yu., Wielgosz P. and Zakharenkova I. High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms, 2012 // Earth Planets Space, Vol. 64, pp. 521-529.
- 5. Feldstein, Y. I., Auroral Oval, J. Geophys. Res., 78(7), 12101213,1973.
- 6. Лазутин Л.Л. "Воздействие магнитных бурь на техносферу и эффект смещения северного магнитного полюса", "Исследования" ТрВ № 108, 2012 с. 10-16.

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ВЫСОКИХ ШИРОТ ВО ВРЕМЯ ПОЛНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 Г.

С.М. Черняков, В.А. Терещенко, О.Ф. Оглоблина, Е.Б. Васильев, А.Д. Гомонов

ФГБУН «Полярный геофизический институт», Мурманск e-mail: sergeich@pgi.ru

Аннотация. Рассмотрено поведение электронной концентрации в D-области ионосферы и космического радиоизлучения во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Наблюдения были выполнены на установке частичных отражений Полярного геофизического института, расположенной на радиофизическом полигоне «Туманный» Мурманской области (69.0 с.ш., 35.7 в.д.). Во время затмения наблюдалось уменьшение электронной концентрации, но при этом отмечены ее изменения, имеющие волнообразный вид.

Abstract. Behavior of electron concentration in the D-region of the ionosphere and cosmic noise during the 20 March total solar eclipse were considered. Observations have been executed on the partial reflections facility at the observatory "Tumanny" (69.0N, 35.7E) of the Polar Geophysical Institute. During the eclipse the reduction of electron concentration was observed but at that time changes in electron concentration had a wave-like appearance.

Введение

Физические явления, происходящие во время солнечного затмения в ионосфере, представляют интерес в виду контролируемых условий их развития и дают удобный случай проверить существующие гипотезы и методики исследований. Изучение солнечных затмений дает полезную информацию для уточнения физических процессов в атмосфере и способствует построению более точных ионосферных моделей.

Наблюдения ионосферных эффектов солнечного затмения начались сразу после появления станций вертикального зондирования ионосферы. Первые исследования рассматривали реакцию ионосферы на полное солнечное затмение как поведение среды во время короткой ночи. Дальнейшие исследования показали, что физические процессы в ионосфере во время солнечных затмений более разнообразны и зависят от многих факторов: времени суток, сезона и т.д. Все это относится к области D, наиболее сложной и менее всего изученной части ионосферы.

Большинство исследований ионосферного отклика на солнечные затмения касаются поведения ионосферы на высотах более 100 км. Влияние затмений на нижнюю ионосферу, особенно в полярных областях, исследовано значительно меньше [Беликович и др., 2008; Терещенко, 2011; Tereshchenko, 2012]. Поэтому наблюдения ионосферных явлений затмения Солнца методом частичных отражений в нижней ионосфере высоких широт представляют интерес.

Параметры установки и затмения в месте наблюдения

Средневолновой радиолокатор вертикального излучения для исследования нижней ионосферы состоит из передатчика, приемника, приемно-передающей фазированной решетки и автоматизированной системы сбора данных. Он расположен на радиофизическом полигоне (р.ф.п.) «Туманный» (пос. Туманный, Мурманской обл.) (69.0 с.ш., 35.7 в.д.). Основные параметры и методика обработки сигналов приведены в работе [Терещенко и др., 2003]. Технические характеристики радиолокатора: рабочие частоты – 2.60-2.72 МГц; мощность передатчика в импульсе – около 60 кВт; длительность импульса – 15 мкс; частота зондирования - 2 Гц (зондирование на обыкновенной, а затем на необыкновенной волне проводится раз в секунду через 275 мс). Значения электронной концентрации, используемые при анализе результатов, получены с помощью регистрируемых секундных данных амплитуд частично отраженных обыкновенной и необыкновенной волн, усредненных по одноминутному интервалу. Антенная решетка состоит из 38 пар скрещенных диполей, занимает площадь 10⁵ м² и имеет ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности около 20°. Поочередно принимаются две круговые поляризации, которые усиливаются приемником прямого усиления с полосой 40 кГц. Амплитуда сигналов регистрируется в интервале высот от 50 до 240 км. Шаг снятия данных по высоте от $h = 0.5 \cdot n$ км, где $n = 1, 2, 3, \dots$ Для измерений поглощения космического радиоизлучения использовалась приемная риометрическая система со стандартным риометром РП-1-32, работающим на частоте 32 МГц. Она состоит из антенны, приемного устройства с устойчивым усилением, регистрирующего устройства и калибровочного источника – шумового диода. Калибровка и проверка работоспособности риометра осуществляется автоматически периодическим подключением контрольного шумового диода на вход приемника.

Полное солнечное затмение 20 марта 2015 г. в пос. Туманном было частным с максимальным покрытием 85.5 % в T_m =10:20:06 UT. Высота Солнца над горизонтом в момент наибольшей фазы затмения была h⊙ =

 20.5° . Затмение в пос. Туманном началось в $T_1 = 09:15:48$ UT. Конец затмения был в $T_4 = 11:23:58$ UT. Затмение на Земле началось в 7:40:51.9 UT и закончилось в 11:50:12.8 UT.

Для выделения периодических сигналов использовался цифровой полосовой эллиптический фильтр (фильтр Кауэра) пакета программ языка программирования МАТЛАБ. Для анализа спектральных составляющих данных использовался вейвлет Морле. Типичные периоды собственных колебаний атмосферы (периоды Бранта-Вяйсяля) равны 5-10 мин в зависимости от состояния атмосферы [*Брюнелли, Намгаладзе*, 1988]. Поэтому в вариациях электронной концентрации было проанализировано присутствие волновых процессов с периодами больше периода Бранта-Вяйсяля (от 10 до 80 мин, внутренние гравитационные волны).

Результаты наблюдений

Покрытие диска Солнца Луной вызывает изменение потока ионизирующего излучения Солнца. Нижняя ионосфера реагирует на это изменением своих параметров. На рис. 1 показаны амплитуды частично отраженных обыкновенной (a), необыкновенной (δ) волн и электронной концентрации (ϵ) для дня затмения 20 марта 2015 г. Сплошной линией внизу нанесено время затмения.

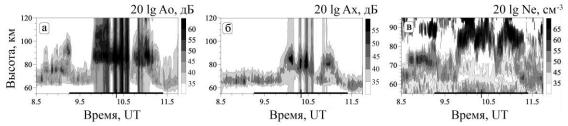


Рисунок 1. Поведение амплитуд, частично отраженных обыкновенной (a), необыкновенной (δ) волн и электронной концентрации (a) в день затмения 20 марта 2015 г.

В электронной концентрации (рис. 1, *в*) во время затмения высота максимума электронной концентрации увеличилась на 20-25 км. В районе максимума затмения наблюдается уменьшение электронной концентрации, т.е. классический эффект «короткой ночи», но при этом на большинстве высот отмечаются локальные увеличения электронной концентрации, имеющие волнообразный вид.

Для оценки влияния солнечного затмения на нижнюю ионосферу были построены высотные профили электронной концентрации в день затмения и в контрольные дни 19 и 21 марта 2015 г. (рис. 2).

На рисунке 1, δ показаны профили электронной концентрации (ПЭК) во время затмения 20 марта 2015 г. Первый профиль (сплошная линия с кружочками, 09:15 UT) показывает ПЭК перед началом затмения. Электронная концентрация растет с ростом высоты. Особенностью его является локальный минимум электронной концентрации на высоте 84 км. Второй ПЭК построен через 50 мин после начала затмения и за четырнадцать минут до максимума затмения (штриховая линия с квадратиками, 10:04 UT). Он показывает уменьшение электронной концентрации на всех высотах, но наибольшее изменение более чем в десять раз имеет место на высотах 73-81 км. Третий профиль (штриховая линия с точкой, маркер – крестик, 10:34 UT) построен через пятнадцать минут после максимума затмения. ПЭК показывает увеличение электронной концентрации на высотах выше 73 км, а на высотах 68-72 км – уменьшение. При этом на высоте 85 км формируется локальный максимум слоя. Четвертый ПЭК (точки, 11:11 UT) построен за десять минут до конца затмения. Ниже 80 км профиль электронной концентрации похож на ПЭК перед затмением, т.е. он возвращается к исходному состоянию до затмения. Выше 80 км электронная концентрация увеличилась и сформировался локальный максимум на высоте 83 км. Пятый профиль (сплошная линия с ромбами, 12:05 UT) построен для ионосферы после затмения и в нижней части профиля до высоты 83 км во многом совпадает с профилем до затмения в 09:15 UT. На высоте 83 км у него формируется локальный минимум, а на высоте 87 км – локальный максимум.

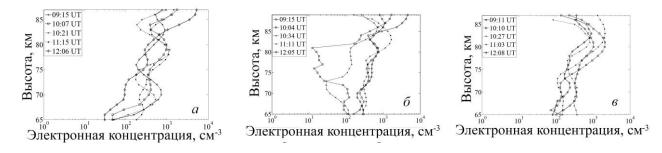


Рисунок 2. Профили электронной концентрации: **a)** 19 марта 2015 г.; **б)** 20 марта 2015 г., **в)** 21 марта 2015 г.

Профили электронной концентрации в 10:04 и 10:34 UT ниже 82 км в целом соответствуют эффекту наступления «короткой ночи», т. е. уменьшению ионизирующей радиации во время затмения. В контрольные дни ПЭК похожи на профили электронной концентрации 20 марта 2015 г. вне периода затмения и не показывают уменьшения электронной концентрации во время, соответствующее времени затмения.

Для примера рассмотрим данные расчета волновых параметров вариаций электронной концентрации для высот 68 км («короткая ночь») и 90 км (волновые процессы). На рис. 3 приведена отфильтрованная электронная концентрация (верхние рисунки) и ее вейвлет-спектр для высот 68 км (слева) и 90 км (справа). Буквами Н, М и К обозначены начало, максимум и конец затмения (эти обозначения одинаковы на всех последующих рисунках). На рисунках вейвлет-спектров (нижние рисунки) по оси абсцисс нанесено время наблюдения в UT, по оси у – периоды волн, полученные при вейвлет-анализе используемых данных.

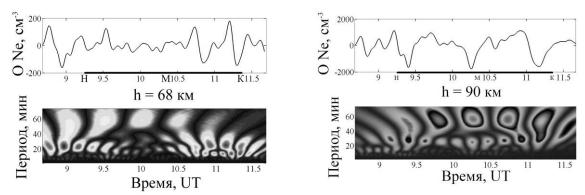


Рисунок 3. Отфильтрованная электронная концентрация (**вверху**) и ее вейвлет-спектр (**внизу**) для высот 68 км (**слева**) и 90 км (**справа**) во время затмения 20 марта 2015 г.

В начале затмения на высоте 68 км в электронной концентрации присутствуют волны с периодами 23 и 57 мин. Волна с периодом 57 мин постепенно ослаблялась и к концу затмения исчезла. Волна с периодом 23 мин с началом затмения начала трансформироваться в две слабые волны с периодами 20 и 28 мин. Около 10:00 UT интенсивность волн с периодами 20 и 28 мин начала уменьшаться, при этом периоды волн начали изменяться: 20-минутный период трансформировался в 23-минутный, а 28-минутный период - в 37-минутный. В 10:40 UT волна с периодом 23 мин трансформировалась в две волны с периодами 14 и 28 мин, а у волны с периодом 37 мин в это же время начал уменьшаться период и к концу затмения он также стал равным 28 мин. К 11:00 UT в районе наблюдения были две волны с периодами 14 и 28 мин. После этого их периоды начали сближаться, пока к 11:30 UT они не слились в одну волну с периодом около 18 мин.

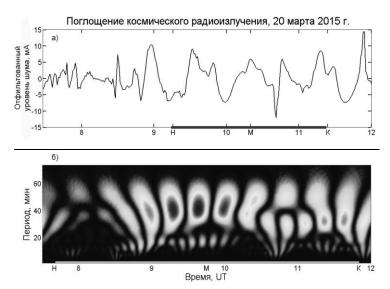


Рисунок 4. а) отфильтрованные данные уровня космического радиоизлучения по данным риометра (от 6 до 60 мин), **б)** вейвлет-спектр отфильтрованных данных

На высоте 90 км в начале затмения были две волны: одна с периодом 27 мин и вторая с периодом 46 мин. При приближении максимума затмения, период 46-минутной волны начал увеличиваться до 57 мин, при этом интенсивность волны также увеличивалась. После максимума затмения интенсивность и период волны начинают уменьшаться. Перед затмением наиболее интенсивной была волна с периодом 27 мин. При приближении максимума затмения интенсивность 27-минутной волны уменьшается, но после максимума

она опять увеличивает свою интенсивность. Более того, период этой волны после максимума начинает непрерывно увеличиваться и к концу затмения ее период и уменьшающийся период волны 57 мин переходят в один период, равный 46 мин.

На рис. 4 показаны: а) отфильтрованные данные уровня космического радиоизлучения по данным риометра, б) вейвлет-спектр отфильтрованных данных. Сплошной линией внизу рисунка а) нанесено время затмения в месте наблюдения и внизу рисунка б) - время всего затмения на Земле. Буквы H, M и K обозначают начало, максимум и конец затмения, соответственно.

По данным риометра перед началом затмения над полигоном появилась слабая волна с периодом 18 мин и более мощная волна с периодом 46.5 мин. При наступлении минимума затмения волна с периодом 18 мин исчезла, в волна с периодом 46.5 мин начала ослабевать и распалась на две волны с периодами 28.5 и 51.5 мин. К концу затмения волны пришли к одному периоду, меньшему, чем до начала расслоения (36.5 мин).

Выводы

Приведены результаты наблюдения эффектов полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере высоких широт по данным установки частичных отражений и риометра, расположенных на р.ф.п. «Туманный» Полярного геофизического института (Мурманская область). Высота максимума электронной концентрации увеличилась на 20-25 км. В районе максимума затмения наблюдается уменьшение электронной концентрации, т. е. классический эффект «короткой ночи». Наибольшее уменьшении получено на высотах 73-81 км. Во время затмения изменения электронной концентрации имеют волнообразный характер. Вейвлет-анализ показал, что в вариациях данных присутствуют колебания периодов, соответствующих внутренним гравитационным волнам. Особенностью поведения волн является плавное изменения периодов волн, раздвоение волн и формирование одной волны из двух. В максимуме затмения отмечено ослабление волн с периодами 10-30 минут. Волнообразное поведение имеет также космическое радиоизлучение. Изменения в электронной концентрации и космическом радиоизлучении могут быть вызваны прохождением акустико-гравитационных волн, сгенерированных при охлаждении атмосферы во время сверхзвукового прохождения лунной тени по поверхности Земли, изменением электронной концентрации и вертикальными движениями в атмосфере.

- 1. Беликович, В. В., В. Д. Вяхирев, Е. Е. Калинина, В. Д. Терещенко, С. М. Черняков, В. А. Терещенко (2008), Отклик ионосферы на частичное солнечное затмение 29.03.2006 по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске, Геомагнетизм и аэрономия, 48 (1), 98-103.
- 2. Терещенко, В. Д., Е. Б. Васильев, Н. А. Овчинников, А. А. Попов (2003), Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы, В кн.: Техника и методика геофизического эксперимента, с. 37-46, Апатиты: Изд. КНЦ РАН.
- 3. Терещенко, В. Д., В. А. Терещенко, С. М. Черняков (2011), Ионосферные эффекты частного затмения солнца 1 июня 2011 г. в Мурманске по данным метода частичных отражений, риометрическим и магнитным данным, в Трудах XVII региональной конференции по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, 15–17 ноября 2011 г., с. 17-21, Санкт-Петербург: ООУП физфака СПбГУ.
- 4. Belrose, J. S., D. B. Ross, and A. G. McNamara (1972), Ionization changes in the lower ionosphere during the solar eclipse of 7 March 1970, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 34 (4), 627-640. doi: 10.1016/0021-9169 (72)90150-X.
- 5. Tereshchenko, V. D., V. A. Tereshchenko, S. M. Cherniakov, and O. F. Ogloblina (2012), Experimental researches of wave disturbances in the polar lower ionosphere during the partial solar eclipse on 1 June 2011, in Proceeding of the XXXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 28 February 2 March, 2012, pp. 115-118, Apatity, Russia, Apatity: KSC RAS, PGI.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ И КОЛЕБАНИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ foF2 В ДИАПАЗОНЕ 1-5 мГц (Pc5/Pi3) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБС. СОДАНКЮЛЯ

Н.В. Ягова 1 , О.В. Козырева 1 , А. Козловский 2

Аннотация. Исследованы спектральные параметры вариаций критической частоты foF2 и геомагнитного поля в диапазоне 1-5 мГц для магнитоспокойных и умеренно возмущенных условий. Изучены отдельные случаи когерентных пульсаций геомагнитного поля и параметров ионосферы и некоторые статистические закономерности. Для этого были использованы данные ионосферного зондирования с 1-мин временным разрешением. Для интервалов, когда критические частоты определяются с достаточной точностью, проведено спектральное оценивание и рассчитаны кросс-спектры вариаций критической частоты foF2и геомагнитного поля. Показано, что на ~10% исследованных интервалов наблюдаются когерентные пульсации, локализованные в узкой полосе широт в вечернем секторе местного магнитного времени (МLТ).

Abstract. Spectral parameters of foF2 and geomagnetic variations in 1-5 mHz frequency range are studied for quiet and moderately disturbed conditions both for individual cases and statistically. For that, 1-min data of Sodankyla digital inosond are used. For intervals when critical frequencies are determined with enough accuracy, spectral estimating is carried out and cross-spectral parameters for the ionospheric critical frequency foF2andgeomagnetic field variations are estimated. Coherent pulsations localized in narrow latitude band in the evening MLT sector are registered for approximately 10% of the intervals studied.

Ввеление

Отдельные случаи когерентных вариаций геомагнитного поля и различных параметров ионосферной плазмы – плотности, электрического поля, ионной и электронной температур неоднократно исследовались (см., например, *Pilipenko et al.*, 2014). При этом фоновые колебания плотности ионосферы в миллигерцовом диапазоне изучены недостаточно, и задача о статистической связи этих колебаний с геомагнитными пульсациями не рассматривалась. Настоящая работа посвящена исследованию отдельных событий и статистических закономерностей связи вариаций критической частоты f₀F2 и геомагнитных пульсаций диапазона 1-5 мГц (Pc5/Pi3). Так как при сильных возмущениях ионограмма становится практически не интерпретируемой, то анализируются периоды низкой и умеренной возмущенности.

Данные и обработка

Для анализа использовались данные ионосферного зондирования и измерений геомагнитного поля обс. Соданкюля, расположенной в Финляндии (67° 22' N, 26° 38' E, CGM: 64.1°, 106.7° L=5.25, местная магнитная полночь UT_{MMN} =21:16UT. Для оценки пространственного масштаба колебаний вдоль геомагнитного меридиана использовались данные станции TRO (69° 40' N, 18° 56' E, CGM:66.64°, 102.9° L=6.6, UT_{MMN} =21:32 UT). Обе обсерватории относятся к магнитометрической сети IMAGE (Tanskanen, 2009). Исходное временное разрешение для геомагнитных данных 10 с, для ионосферных – 60с.

Для сравнения с данными ионосферного зондирования геомагнитные данные после низкочастотной фильтрации децимировались до общей частоты 16.67 мГц. Для анализа визуально отбирались интервалы, когда непрерывно определяется критическая частоты и для отобранных дней проводилось спектральное оценивание методом Блэкмана-Тьюки (Kay, 1988), рассчитывались спектры мощности для вариаций критической частоты и горизонтальных компонент геомагнитного поля P_f и их кросс-спектры в представлении: квадрат спектральной когерентности γ^2 и разность фаз Δ ф.

Результаты

1. Примеры

Наиболее типичным является случай некогерентных вариаций критической частоты и геомагнитного поля. Пример таких вариаций, наблюдавшихся в позднем вечернем секторе (MLT=20) 11 ноября 2014 г. показан на рис. 1. Спектральный состав пульсаций различен: в геомагнитных пульсациях доминирует частота 1.4

 $^{^{1}}$ ИФ3 РАН, Москва (nyagova@yandex.ru) 2 Геофизическая обс. Соданкюля, Соданкюля, Финляндия

м Γ ц, а в ионосфреных – 2.2 м Γ ц. Это отражается и в спектре когерентности (нижняя правая панель). Для всех частот γ^2 <0.4,

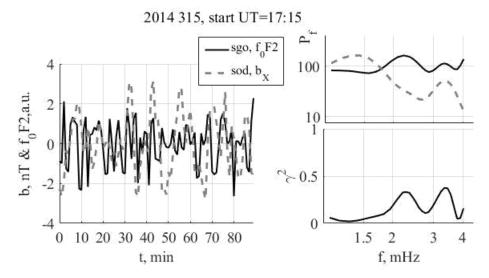


Рисунок 1. Пример некогерентных вариаций b_X компоненты геомагнитного поля и критической частоты foF2 (слева). Спектральная плотность мощности (правая верхняя панель) и квадрат спектральной когерентности (правая нижняя панель).

Пример когерентных пульсаций показан на рис. 2. Пульсации наблюдались в околополуночном секторе (MLT=23) 24 февраля 2014 года.

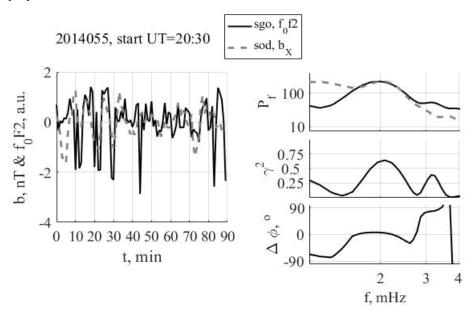
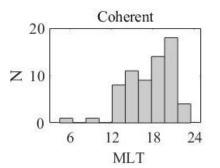


Рисунок 2. Пример когерентных вариаций b_X компоненты геомагнитного поля и критической частоты foF2 (**слева**). **Справа** сверху вниз: спектральная плотность мощности, квадрат спектральной когерентности и разность фаз.

2. Статистика

Ниже представлены сравнения некоторых параметров, характеризующих частоты появления пульсаций foF2, когерентных b_X , и для всех интервалов, для которых были оценены спектры foF2 без деления по когерентности. На рис. 3. представлены распределения частот появления по местному магнитному времени MLT.

Из рисунка видно, что когерентные пульсации пульсаций foF2 и b_X локализованы в основном в вечернем секторе MLT.Важной характеристикой геомагнитных пульсаций является их пространственный масштаб. Для оценки пространственного масштаба геомагнитных пульсаций, когерентных с пульсациями foF2, были рассчитаны спектры когерентности для пары станций SOD-TRO, расположенных вдоль геомагнитного меридиана и разнесенных примерно на 3° . Результаты представлены на рис. 4.



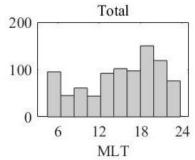
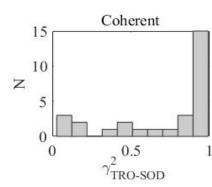


Рисунок 3. Суточный ход частоты появления интервалов когерентных пульсаций foF2 и b_X (слева) и всех интервалов, для которых было проведено спектральное оценивание вариаций foF2 (справа), за 2015 г.



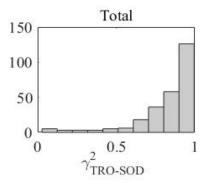


Рисунок 4. Распределение интервалов когерентных пульсаций foF2 и b_X (**слева**), и всех интервалов, для которых было проведено спектральное оценивание вариаций foF2 (**справа**), за 2015 г по когерентности геомагнитных пульсаций на квазимеридиональной паре станций TRO-SOD.

Геомагнитные пульсации, когерентные с пульсациями foF2, имеют в среднем меньший пространственный масштаб в меридиональном направлении, чем пульсации для произвольных интервалов (доля низких значений $\gamma^2_{\text{TRO-SOD}}$ существенно выше на левой гистограмме, чем на правой). Таким образом, когерентные пульсации foF2 и b_X локализованы в узкой полосе широт в вечернем секторе MLT.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что фоновые возмущения критической частоты foF2 в частотном диапазоне Pc5 не связаны с геомагнитными пульсациями. Вместе с тем, примерно в 10% интервалов, для которых возможно спектральное оценивание вариаций критической частоты в этом диапазоне, наблюдаются пульсации, когерентные с пульсациями геомагнитного поля. Эти пульсации сосредоточены в вечернем секторе МLТи локализованы в узкой широтной полосе, что предполагает предположить их связь с высыпаниями частиц.

Благодарности. Работа поддержана грантами РФФИ № 15-05-01814 А (Ягова Н.) и "Academy of Finland grant 298578" (Козырева О.). Авторы благодарят организации, поддерживающие наблюдения на сети IMAGE за предоставленные данные (http://space.fmi.fi/image/index.html).

- 1. Kay, S.M.: Modern spectral estimation: Theory and application. Prentice-Hall, 543 p., 1988.
- 2. Pilipenko, V., V. Belakhovsky, A. Kozlovsky, E. Fedorov, and K. Kauristie, ULF wave modulation of the ionospheric parameters: Radar and magnetometer observations, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 108, 68-76, 2014.
- 3. Tanskanen, E.I.: A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993-2003 examined, J. Geophys. Res., 114, A05204, doi:10.1029/2008JA013682, 2009.

ЧАСТОТЫ ПОЯВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОИЗВОДНЫХ ПО ВРЕМЕНИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СЕТИ IMAGE

Н.В. Ягова¹, А.Д. Лхамдондог², Ю.П. Гусев², В.А. Пилипенко^{1,3}, Е.Н. Федоров¹

Аннотация. По данным более чем 20 лет наблюдений геомагнитного поля на станциях сети IMAGE изучены частоты появления и пространственные масштабы экстремальных значений модуля производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля |db/dt|, представляющих потенциальную опасность для промышленных электрических сетей. Показано, что наряду с известными и успешно прогнозируемыми возмущениями во время сильных магнитных бурь, экстремальные значения |db/dt| могут возникать во время умеренных бурь и даже вне бури. В настоящее время прогноз таких возмущений невозможен и необходим анализ апостериори с целью выявления факторов космической погоды, благоприятных для возникновения экстремальных значений геомагнитно-индуцируемых токов (ГИТ).

Abstract. Occurrence rates and spatial scales of geomagnetic field time derivatives |db/dt| extremal disturbances potentially dangerous for electric lines are studied using more than 20 years of the IMAGE geomagnetic observations. Our analysis shows that along with the well known superstorm disturbances, extremal db/dt values occur during moderate storms and even without any storm. Now such disturbances cannot be predicted and aposteriori analysis is necessary in order to reveal space weather parameters favorable for the occurrence of extremal |db/dt| values.

Введение

Резкие изменения геомагнитного поля могут приводить к сбоям в работе энергосистем, вызванных геомагнитно-индуцированными токами (ГИТ). Из всех типов возмущений геомагнитного поля, наибольшими амплитудами и пространственными масштабами обладают магнитные бури. Они же являются и наиболее прогнозируемыми возмущениями, так как постоянный мониторинг ключевых параметров солнечного ветра и межпланетного поля ведется на космических аппаратах в точке либрации с упреждением порядка часа до подхода потока солнечной плазмы к магнитосфере Земли. Вероятность появления экстремальных возмущений горизонтальных компонент поля растет с интенсивностью бури. При этом возмущения смещаются на более низкие геомагнитные широты. Возмущения достигают максимальных значений на ночной стороне и связаныс развитием суббури. Статистический анализ параметров экстремальных геомагнитных возмущений для суббурь, возникающих во время бури и вне бури, проведен в работе (Viljanen, 2006).

С подробным обзором аварийных ситуаций, спровоцированных геомагнитными возмущениями, можно ознакомиться, например, в обзоре (*Pulkkinen et al.*, 2008). Анализ моделей мировой экономики показал, что всего лишь 10% уменьшение подачи электроэнергии в индустриальных районах Земли из-за сильной геомагнитной бури может оказать на мировую экономику такое же влияние как региональные войны или глобальный мировой кризис (*Schulte in den Baumen et al.*, 2014). В США после аварийного обесточивания (blackout) вызванного сильной магнитной бурей 1989 г. (*Allen et al.*, 1989), по инициативе Координационного Совета Северо-восточной Электроэнергетической Системы, был разработан нормативный документ о мерах по повышению надежности энергетических систем при геомагнитных бурях. Тем не менее, в отечественной нормативной документации влияние ГИТ на электроэнергетические системы и на надежность работы электрооборудования до сих пор не учитывается, хотя задача учета, а в перспективе — прогноза, потенциально опасных для электрических сетей геомагнитных возмущений является актуальной именно для России из-за большой протяженности электрических сетей, в том числе на авроральных и субавроральных широтах.

Аварийные ситуации, связанные с ГИТ, вызываются несколькими физическими причинами. Наиболее важными являются возникновение разности потенциалов между заземленными нейтралями трансформаторов и смещение рабочей точки на кривой намагничивания магнитопровода (*Boteler*, 2014). Наблюдаемые при магнитных возмущениях токи «подмагничивания» сердечников трансформаторов

¹ИФ3 РАН, Москва (e-mail: nyagova@yandex.ru) ²НИУ МЭИ, Москва

³Геофизический центр РАН, Москва

напряжения и, тем более, сердечников силовых трансформаторов, сами по себе не могут быть опасны, но при наличии «подмагничивания» могут значительно возрасти пусковые токи силовых трансформаторов и возникнуть феррорезонансные явления в цепях с трансформаторами напряжения.

Gircis (2012) и Вахнина (2013) рассматривают влияние ГИТ на силовые трансформаторы в установившихся режимах иотмечают увеличение высших гармоник тока и дополнительный нагрев сердечников и обмоток трансформаторов. Однако, до настоящего времени не исследовано влияние ГИТ на переходные процессы, в частности, на пусковые токи, возникающие при подаче напряжения на трансформатор. При подаче напряжения на трехфазные силовые трансформаторы в обмотках возбуждаются апериодические составляющие. Ток намагничивания может на порядок превышать номинальный ток и приводить к срабатыванию релейной защиты. Апериодическая составляющая тока включения зависит от начальной фазы напряжения. ГИТ по механизму воздействия на силовые трансформаторы аналогичны апериодическим составляющим токов включения. Наиболее опасным является сложение эффектов ГИТ и токов включения. Влияние ГИТ на переходные процессы в силовых трансформаторах необходимо учитывать при выборе типов релейных защит, схеме их подключения к трансформаторам тока и при проверке отстройки параметров срабатывания релейных защит от пусковых токов.

Решение этой задачи включает три основных этапа: анализ параметров геомагнитных возмущений с целью создания эмпирической модели и возможного прогноза потенциально опасных возмущений, оценка электрических полей, возникающих в реальных сетях с учетом геоэлектрических параметров подстилающей поверхности и геометрии сети, расчет возможных эффектов в элементах сети. Настоящая работа посвящена анализу геомагнитных возмущений на основе данных регистрации магнитного поля на сети европейских авроральных и субавроральных станций и по сути является шагом к созданию эмпирической модели геомагнитных возмущений, потенциально опасных для промышленных электрических сетей.

Данные и обработка

Анализировались возмущения горизонтальных компонент геомагнитного поля за период с максимума 23-го по максимум 25-го солнечного цикла (1993-2015) по сети магнитометров IMAGE (*Tanskanen*, 2009). Для анализа использовались данные с временным разрешением 10 с. 23 станций, расположенных на геомагнитных широтах от 67° до 56°. Для характеристики интенсивности магнитных бурь использован индекс Dst.

Для оценки потенциально опасных возмущений оценивались значения модуля производной по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля |db/dt/. Единичным событием считалось превышение модуля производной по времени горизонтальной компоненты магнитного поля |db/dt/ порогового значения b_t^b =6нТл/с. Для возмущений, наблюдавшихся на двух или более станциях, оценивался пространственный масштаб в направлении нормали к компоненте (вдоль параллели для b_X и вдоль меридиана для b_Y). Проанализированы возмущения, наблюдавшиеся в зонах 60-64°и 56-60° геомагнитной широты во время всех сильных магнитных бурь с Dst<-200 нТл,и проведен сплошной анализ четырех лет на разных фазах солнечного цикла (2005, 2009, 2012 и 2015 гг.). Для оценки вероятности возникновения возмущений, вызывающих потенциально опасные значения ГИТ, используются абсолютная f и относительная f^* частоты появления надпороговых возмущений с $|db/dt/>b_t^b$, где f^* определяется как отношение числа надпороговых возмущений |db/dt/| к числу дней с Dst, превышающим заданное значение.

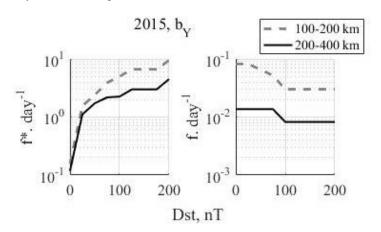


Рисунок 1. Зависимость относительной (f^*) и абсолютной (f) частот появления надпороговых возмущений b_Y компоненты геомагнитного поля в 2015 году на геомагнитных широтах 60-64° от интенсивности бури. Сплошными линиями показаны возмущения масштаба 200-400 км вдоль геомагнитного меридиана, штриховой – 100-200 км.

Результаты

Зависимость f^* для возмущений геомагнитного поля, наблюдавшихся в 2015 г. на геомагнитных широтах 60-64°, от Dst представлена на левой панели рис. 1. Частота появления надпороговых возмущений растет с интенсивностью бури. Но из-за уменьшения частоты появления магнитной бури с интенсивностью вклад больших бурь в полное количество надпороговых возмущений |db/dt| не является определяющим. Зависимость абсолютной частоты появления fнадпороговых возмущений |db/dt| от Dst представлена на рис. 1 справа. Наибольший вклад в полное количество событий вносят умеренные бури с Dst около -100 нТл. При этом не существует порога по Dst для появления надпороговых значений |db/dt|, то есть, они могут наблюдаться и вне бури при высокой авроральной активности.

Существует заметный разброс частоты появления экстремальных возмущений |db/dt| во время бурь одинаковой интенсивности, то есть, вероятность возникновения экстремального возмущения зависит и от других факторов космической погоды. Статистически это проявляется в неодинаковых зависимостях частот появления надпороговых возмущений |db/dt| от Dst для разных лет солнечного цикла.

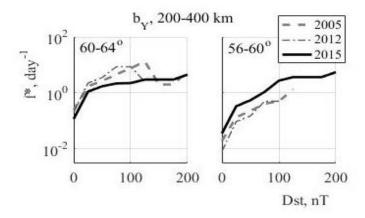


Рисунок 2. Зависимость относительной частоты появления надпороговых возмущений b_Y компоненты геомагнитного поля на субавроральных (**слева**) и средних (**справа**) широтах от интенсивности бури на разных фазах солнечного цикла.

На рис. 2 представлены зависимости относительной частоты появления надпороговых возмущений |db/dt/, имеющих пространственный масштаб от 200 до 400 км, от Dst для трех лет: 2005, 2012 и 2015, приходящихся, соответственно, на фазы спада, роста и максимума солнечной активности. В 2009 г. в минимуме солнечной активности таких возмущений не было зарегистрировано. Частота появления экстремальных значений |db/dt/ во время бури с данным Dst отличаются для разных фаз цикла солнечной активности и на разных геомагнитных широтах. Так на субавроральных широтах более опасными оказываются бури на фазах роста и спада солнечной активности, а для средних – в максимуме.

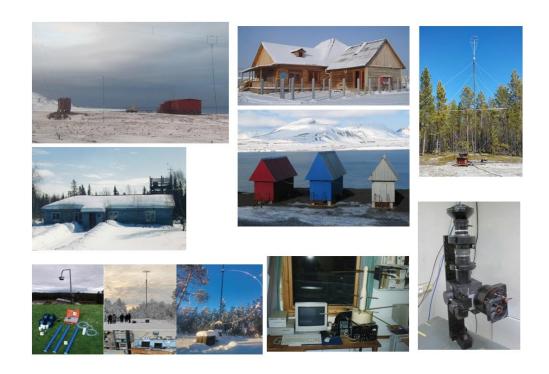
Обсуждение и выводы

Проведенное исследование экстремальных возмущений горизонтальных компонент магнитного поля и их пространственных масштабов выявило, что только небольшая доля потенциально опасных для электрических сетей возмущений геомагнитного поля связана с магнитными бурями большой интенсивности, а большая часть таких возмущений приходится на бури умеренной интенсивности. Выявленная существенная вероятность появления экстремальных возмущений |db/dt| вне бури ставит вопрос о принципиальной осуществимости прогноза потенциально опасных возмущений.

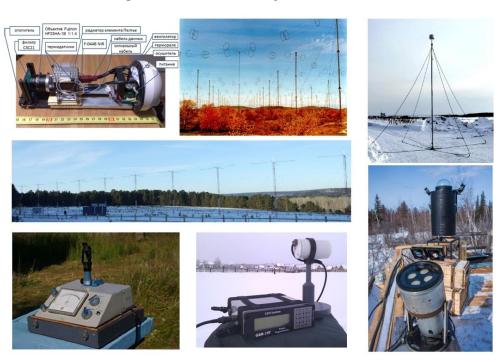
Первым шагом для решения задачи прогноза являлось бы создание эмпирической модели для экстремальных возмущений производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля для заданной геомагнитной широты. Для создания такой модели необходим учет пространственного масштаба возмущений и выявление факторов космической погоды вне и внутри магнитосферы, контролирующих вероятность их появления. Возможность создания такой модели и в перспективе — прогноза потенциально опасных для электрических сетей геомагнитных возмущений, зависит от решения ряда промежуточных задач. Существуют как принципиальные физические ограничения, связанные с возможностью спонтанного возникновения возмущений внутри магнитосферы или «большой магнитосферы», т.е. магнитосфере вместе с магнитослоем, без тригтера в солнечном ветре (*Hurricane*, 1999; Ягова, 2015), так и технические проблемы, вызванные недостаточной плотностью имеющихся в российской Арктике сетей регистрации геомагнитного поля с высоким временным разрешением.

Благодарности. Работа поддержана грантом РНФ № 16-17-00121 (Пилипенко В. А., Федоров Е. Н.). Авторы благодарят организации, поддерживающие наблюдения на сети IMAGE за предоставленные данные (http://space.fmi.fi/image/index.html).

- 1. Allen, J., L. Frank, H. Sauer, P. Reiff: Effects of the March 1989 solar activity, EOS, 14, 1479–1488, 1989.
- Boteler, D.: Methodology for simulation of geomagnetically induced currents in power systems. J. Space Weather Space Clim., A21, 4, 2014.
- 2. Gircis, R., Vedante, K., Gramm, K.: Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems, CIGRE, A2-304, 2012.
- 3. Hurricane, O.A., Fong, B.H., Cowley, S.C., Coroniti, F.V., Kennel, C.F., Pellat, R., Substorm detonation: J. Geophys.Res., 104, 10221, 1999.
- 4. Pulkkinen, A., Pirjola, R., Viljanen, A.: Statistics of extreme geomagnetically induced current events, Space Weather, 6, S07001, 2008.
- 5. Schulte in den Bäumen H., D. Moran, M. Lenzen, I. Cairns, A. Steenge: How severe space weather can disrupt global supply chains, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2749–2759, 2014.
- 6. Tanskanen, E.I.: A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993-2003examined, J. Geophys. Res., 114, A05204, doi:10.1029/2008JA013682,2009.
- 7. Viljanen, A., Tanskanen, E. I., Pulkkinen, A.: Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field, Ann. Geophys., 24, 725-733, 2006.
- 8. Вахнина, В.В., Кувшинов, А.А., Кузнецов, В.А.: Снижение рисков развития аварий в системах электроснабжения при геомагнитных бурях. Гелиогеофизические исследования. № 5, 115-123, 2013.
- 9. Ягова, Н.В.: Наклон спектра высокоширотных геомагнитных возмущений диапазона 1–5 мГц. Контролирующие параметры вне и внутри магнитосферы, Геомагнетизм и Аэрономия, 55, 35–44, 2015.



Комплексная сеть наблюдательных средств, базы оперативных гелиогеофизических данных в арктическом регионе РФ (стендовые доклады)



НЕЙТРОННЫЙ МОНИТОР В БАРЕНЦБУРГЕ

Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко, Л.И. Щур

Полярный геофизический институт, Anamumы, Poccuя (e-mail: balabin@pgia.ru)

Аннотация. Представлены результаты работы нейтронного монитора в Баренцбурге (арх. Шпицберген, 78.2 N 14.2 E) с момента его установки в 2003 г по настоящее время. Этот монитор является уникальным российским прибором, единственным аналогом ему в северном полушарии является нейтронный монитор Туле в Гренландии. Особенность монитора в Баренцбурге в том, что он принимает космическую радиацию из направлений, близких к северному полюсу эклиптики. За время работы монитор зарегистрировал несколько событий в солнечных космических лучах. Этот монитор оснащен современной скоростной системой сбора, фиксирующей приход каждого импульса с точностью 1 мкс. Это позволяет сохранять в данных детальную информацию о временных и энергетических характеристиках потока космических лучей. В настоящее время он также дополнен детекторами для измерения других компонентов космических лучей с целью создания в Баренцбурге установки комплексного мониторинга всех основных компонентов космических лучей. Нейтронный монитор в Баренцбурге входит в мировую сеть мониторов.

Abstract. The results of Barentsburg (78.2 N 14.2 E) neutron monitor operation from 2003 are presented. This is the essential unit of the Russian net of the cosmic ray detectors. Only Thule neutron monitor in Greenland is similar in the north hemisphere. The main facility of Barentsburg neutron monitor is an asymptotic cone of acceptance. Its asymptotic cone is on ecliptic north pole direction. The neutron monitor has registered some ground level enhancements during operation. It is equipped a fast registration system which fixes electric pulse coming with 1 mcs accuracy. The system allows recording detail information about temporal and energetic characteristic of the cosmic rays flux. Now Barentsburg neutron monitor station has other detectors: detector of moderate neutrons (up to 100 keV) and scintillation one (20-400 keV). It is done to develop the neutron monitor to an integrated set of monitoring. Barentsburg neutron monitor is on the world net of the monitors.

Введение

Нейтронный монитор (НМ) ПГИ в Баренцбурге (78.2 N, 14.2 E) является стандартным нейтронным мониторов 18-НМ-64 и уникальным по расположению российским прибором, единственным аналогом ему в северном полушарии является НМ Туле в Гренландии. В паре с НМ в Апатитах (67.6 N, 33.4 E) два эти прибора обеспечивают измерение потока космических лучей из области северного полюса мира (перпендикулярно плоскости эклиптики) и из плоскости эклиптики. Особенности строение магнитосферы Земли таковы, что даже северные НМ (Апатиты, Тикси, Норильск и др.) принимают потоки космических лучей из направлений, близких к эклиптике. И только НМ в Баренцбурге, располагаясь в области магнитосферного каспа, имеет асимптотический конус приема, направленный в сторону северного полюса мира. Наличие двух НМ со столь различными конусами приема дает возможность изучать анизотропию космических лучей, что является их особенностью. НМ в Баренцбурге оснащен современной скоростной системой сбора, фиксирующей приход каждого импульса с точностью 1 мкс. Это позволяет сохранять детальную информацию о временных и энергетических характеристиках потока космических лучей. За время работы НМ с 2003 г было зарегистрировано несколько событий в солнечных космических лучах (международное обозначение – события GLE). Установка НМ в такой ключевой точке обеспечивает данные о космических лучах, приходящих из направлений, близких к северному полюсу эклиптики. Данные НМ в Баренцбурге используются в методике решения обратной задачи для определения спектра солнечных космических лучей (СКЛ) [1].

События GLE и спектр СКЛ

С момента установки в 2003 г НМ в Баренцбурге зарегистрировал несколько событий GLE: от GLE65 по GLE72. Причем, GLE69 оказалось вторым по силе за все время наблюдения космических лучей: амплитуда возрастания на южнополярных станциях достигала ~5000 %, в Баренцбурге — 150 % [2]. Как видим, анизотропия СКЛ может быть весьма сильной и доходить до 1. Это связано с тем, что СКЛ распространяются от Солнца вдоль линий межпланетного магнитного поля, полярность и конфигурация которого во многом определяется магнитными полями на Солнце. Если турбулентность межпланетного магнитного поля невелика, то рассеяние частиц на магнитных неоднородностях мало, и поток сохраняет узкую направленность на всем пути до Земли. События GLE 23-го цикла (GLE65 28.10.03, GLE66 29.10.03, GLE67 02.11.03 и GLE69 20.01.05) имели северо-южную асимметрию с доминированием южного направления, как это показано на рис.1. Южнополярные станции в этих событиях GLE принимали прямой

(пришедший напрямую от Солнца) поток СКЛ, а севернополярные (Баренцбург) – обратный (рассеянный на магнитных неоднородностях) [3]. В первые часы поток был узконаправленным, рассеяние мало, и Баренцбург в течение 2-3 часов не отмечал никакого потока СКЛ, хотя в это время в южном полушарии он достигал максимума. Именно потому, что Баренцбург дает информацию о потоках космических лучей из направлений, недоступных для других НМ, его данные ценные, и он является одной из ключевых станций при использовании методики решения обратной задачи СКЛ. Эта методика была разработана в ПГИ. С ее помощью по данным мировой сети нейтронных мониторов определяется первичный (на границе магнитосферы Земли) спектр СКЛ. По этой методике спектр СКЛ вычисляется с небольшим шагом по времени (обычно 5 мин.) в течение всего события GLE. В итоге можно проследить динамику спектра СКЛ от начала до конца GLE [1-4]. Пример спектров СКЛ в событии GLE показан на рис. 1в. Эти спектры являются результатом решения обратной задачи и определяют поток СКЛ (протонов с энергиями до ~10 ГэВ), который затем легко использовать при расчете ионизации в атмосфере или поглощенной дозы [5]. В 24-м цикле солнечной активности произошли всего два GLE (17.05.12 и 06.01.14). В первом GLE максимальную амплитуду в 18 % показала ст. Апатиты. Второе GLE имело малую амплитуду (наибольшее значение около 3 % показал как раз Баренцбург), и наблюдалось это событие на небольшом числе станций. Полученные спектры СКЛ далее используются при расчете дополнительной ионизации в атмосфере, возникающей при событиях GLE, при вычислении радиационных доз [7]. Также по форме спектра затем можно определять условия генерации СКЛ на Солнце [8].

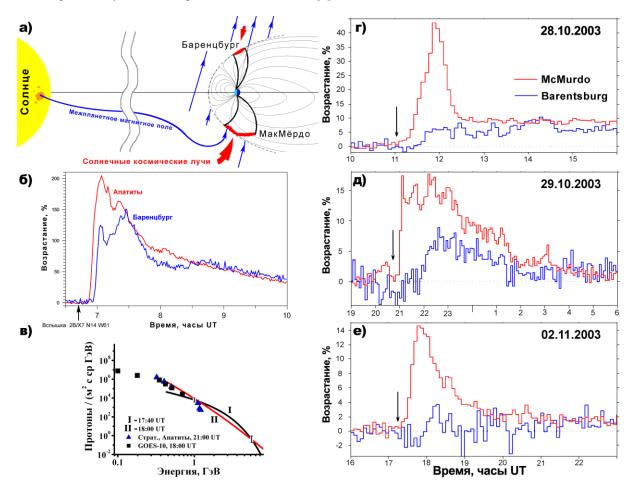


Рисунок 1. а) Схема возникновения северо-южной асимметрии. Большая стрелка снизу — прямой поток от Солнца. Маленькая сверху — поток рассеявшихся более чем на 90^0 частиц.

- **б)** Профиль возрастания на ст. Апатиты и Баренцбург в событии гигантском GLE69 (20.01.05). Амплитуда возрастания на ст. Терре Адели в Антарктике достигала \sim 5000 %.
- **в)** Спектр СКЛ в событии GLE67, полученный по разработанной в ПГИ методике решения обратной задачи. Момент I соответствует максимуму потока СКЛ, II на фазе спада. Приведены также данные прямых измерений СКЛ в стратосфере на шарах-зондах (Апатиты) и на спутнике.
- **г) е)** Профили возрастаний на ст. Баренцбург (севернополярная) и МакМёрдо (южнополярная) во время событий GLE65, GLE66, GLE67. Стрелками показаны моменты начала радиовсплеска II типа и хромосферной вспышки, указывающего на начало генерации СКЛ [6].

Дополнительные возможности НМ в Баренцбурге

В результате поэтапной модернизации возможности НМ в Баренцбурге как детектора космических лучей значительно возросли. Параллельно стандартным данным (число импульсов в минуту) на НМ происходит запись точного (до 1 мкс) времени появления каждого импульса, соответствующего регистрации нейтрона. Это осуществляется скоростной системой сбора данных.

Первое, что обеспечивает скоростная система, это возможность преобразовывать исходные данные в типичные (счет в единицу времени) с любым временным разрешением, например, 1 сек. Конечно, уменьшение времени ведет к увеличения случайных флуктуаций, однако, для некоторых исследований (например, изучение мерцаний) это может быть нужно. При этом требуемое разрешения устанавливается post factum при обработке записанных данных и на работу НМ не влияет.

Новая система сбора позволяет изучать последовательности прихода на НМ частиц космических лучей, их распределение во времени. Конечно, в основном появление очередной частицы носит случайный характер и описывается законом Пуассона. Однако, частицы высоких энергий (от десятков ГэВ) образуют в атмосфере и окружающем веществе ливни частиц, и приход на НМ таких ливней вызывает на нем известное явление множественность [9]: регистрацию серии импульсов с малыми временами между ними (десятки и сотни мкс против 10-20 мс среднего времени между появлением на НМ частиц). Множественность, которая возникает внутри вещества НМ (в основном, в свинце), связана с попаданием на НМ одной высокоэнергичной частицы, создающей ядерный каскад в свинце. Таким путем возникают множественности числом М до 10-15 [9, 10]. Множественности М = 15-100 производятся ливнями, возникающими в атмосфере над НМ [10, 11]. Новая скоростная система позволяет применять НМ для регистрации адронных стволов ШАЛ. Дело в том, что НМ в Баренцбурге имеет модульную конструкцию: он состоит из трех секций 6-НМ-64, каждая из которых размещена в отдельном домике; расстояние между секциями ~6 м (рис. 2). Благодаря модульности конструкции и скоростной системе можно обнаруживать события, когда одновременно серии импульсов, образующих множественность, возникают в двух разных секциях, разделенных дистанцией 5-10 м. Такие событии могут возникать только от адронных стволов ШАЛ [12], накрывающих сразу все секции. В работе [13] НМ в Баксане, также оснащенный скоростной системой регистрации, использовался для детектирования адронных стволов ШАЛ. Но там для определения момента прихода ШАЛ применялась установка ШАЛ "Ковер", находящаяся рядом с НМ. В Баренцбурге в силу его секционного устройства можно обойтись без дополнительного устройства, определяющего приход ШАЛ, поскольку сам факт появления множественности сразу на двух секциях является указателем на появление ШАЛ.



Рисунок 2. Три секции 6-НМ-64 в Баренцбурге образуют стандартный прибор 18-НМ-64.

В помещении одной из секций также установлены два дополнительных прибора: детектор нейтронов (от тепловых до энергий 100 кэВ) на основе трубок СНМ-18 и сцинтилляционный детектор гамма-излучения на диапазон 20-400 кэВ. Данные ото всех детекторов поступают на единую систему сбора данных. Нейтронный монитор чувствителен к нуклонной компоненте космических лучей (в основном, к нейтронам). Для полного и детального мониторинга космических лучей станция в Баренцбурге дополнена этими детекторами. Поскольку могут проявляться различные эффекты (прежде всего атмосферного происхождения) в других компонентах космических лучей, не затрагивающие нуклонную компоненту. Измерения фонового гамма-излучения, приходящего из атмосферы (поток из нижней полусферы экранирован свинцовой защитой), показали [14], что во время осадков происходит возрастание на 30-40 % от уровня ясной погоды. Эти возрастания происходят круглый год при любом типе осадков. Такой же детектор гамма-излучения ранее был установлен в Апатитах, и на нем давно ведется исследование этого явления — возрастания гамма-фона при осадках. Рядом дополнительных экспериментов было показано [15], что эти возрастания не связаны ни с

радиоактивным загрязнением осадков, ни с выделениями радона из почвы. Спектр гамма-излучения имеет форму, близкую к форме тормозного излучения. Основная гипотеза происхождения дополнительного гамма-излучения состоит в том, что энергичные заряженные частицы (десятки МэВ) набирают дополнительную энергию в электрических полях дождевых облаков [16], а затем излучают ее в форме тормозного излучения. В электрических полях облаков они дополнительно набирают энергию $\Delta \varepsilon = E \cdot \Delta x$, где E – напряженность электрического поля, а Δx – путь частицы в облаке. При напряженности поля 10 кВ/м [15] и толщине облака 1 км это составит $\Delta \varepsilon = 10$ МэВ. В процессе дальнейшего (ниже облака) распространения частиц в атмосфере происходит потеря энергии. Часть ее тратится на ионизацию воздуха, часть – в форме тормозного излучения. Ст. Баренцбург в изучении возрастаний используется совместно с Апатитами, причем, данные Баренцбурга являются опорными, поскольку местность, где находится Баренцбург, удалена от населенных и промышленных центров на тысячи км. Поэтому наблюдаемый там эффект возрастания гамма-излучения при осадках можно считать свободным от антропогенного влияния.

Заключение

Установленный ПГИ нейтронный монитор в Баренцбурге на Шпицбергене является уникальным прибором как по месту расположения (в магнитосферном каспе), так и по своему оснащению. Асимптотический конус приема этой станции обращен к северному полюсу эклиптики, и данные этого НМ дают информацию о потоках космических лучей из этого направления. Данные НМ используются для получения спектров СКЛ по время событий GLE. Скоростная система регистрации позволяет применять НМ для исследования быстрых процессов, связанных с космическими лучами в атмосфере. Кроме того, рядом с НМ установлены детекторы для регистрации нейтронов умеренных энергий и гамма-квантов. Баренцбург можно назвать комплексом для мониторинга космических лучей в высокоширотной области Арктики.

- 1. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of relativistic solar proton spectra derived from GLE modeling. Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, V.8, P.168. doi:10.5194/astra-8-1-2011.
- 2. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. и др. Релятивистские солнечные протоны в событии 20 января 2005 г. Модельные исследования // Геомагнетизм и Аэрономия, 2006, Т.46, № 4, С.449.
- 3. Miroshnichenko L.I., K.-L. Klein, Trottet G. et al. Electron acceleration and relativistic nucleon production in the 2003 solar event // Adv. Space Res. 2005, V.35, P.1864. doi:101016/j.asr2005.02.041.
- 4. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. и др. Анализ события GLE72 6 января 2014 г. // Изв.РАН, Серия физическая, 2015, том 79, № 5, с. 612.
- 5. Работа по ионизации при ГЛЕ.
- 6. Cliver E.W., Kahler S.W., Shea M.A. et al. Injection onsets of ~2 GeV protons and ~1 MeV electrons and ~100KeV electrons in solar cosmic ray flares // Astrophys. J. 1982, V. 260. P.362.
- 7. Buetikofer R., Fueckiger E., Balabin Yu. et al. The reliability of GLE analysis based on neutron monitor data a critical review // 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2-9 July 2013.
- 8. Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Мингалев О.В. и др. Спектр солнечных космических лучей: данные наблюдений и модельных расчетов // Астрон. Ж. 2005, Т.82. С. 940.
- 9. Дорман Л.И. «Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей», М.: Наука. 1975. 402 С.
- 10. Янчуковский В.Л., Филимонов Г.Я. Исследование вариаций интенсивности космических лучей с использованием эффекта локальной генерации нейтронов // Изв.РАН. Серия физическая. 2001. Т. 65. № 3. С. 394.
- 11. Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Maurchev E.A. et al. Fine structure of neutron multiplicity on neutron monitors. // Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, V.7, P.283-286. doi:10.5194/astra-7-283-2011.
- 12. Хаякава С. Физика космических лучей. Часть 1. М.: Мир, 701 с. 1973.
- 13. Dzhappuev D.D., Balabin Yu.V., Gvozdevsky et al. Hadrons with energies of Eh>50 MeV in EAS with Ne=10⁵-10⁷. // Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, V.7, P.365. doi:10.5194/astra-7-365-2011.
- 14. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Вариации естественного рентгеновского фона в полярной атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия, 2014, том 54, № 3, с. 376.
- 15. Gvozdevsky B.B., Balabin Yu.V., Germanenko A.V. et al., On the origin of X-ray increases during precipitations // Proc. of 32nd ICRC (China, Beijing, 11–18 August 2011), Id 863.
- 16. Rust W.D., Trapp R.J. Initial balloon soundings of the electric field in winter nimbostratus clouds in the USA // Geophys. Res. Lett.. 2012. V.29, P.1959-1962. DOI 10.1029/2002GL015278.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕДЕНИЯ СЕРОГО ТЮЛЕНЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ЧАСТОТ В ДИАПАЗОНЕ 0,01-36 ГЦ

В.Ф. Григорьев 1 , А.П. Яковлев 2 , А.Л. Михайлюк 2 , Т.В. Григорьева 3

Аннотация. Представлены первичные результаты исследований влияния низкочастотных электромагнитных полей на поведение серого тюленя. Определены частотные характеристики ЭМП, при воздействии которых изменения в поведении животного отклоняются от фоновых показателей. Разработана методика проведения эксперимента и предложены критерии оценки изменений в поведении серых тюленей, в ответ на воздействие электромагнитных полей с экстремально низкими частотными характеристиками.

Abstract. The article presents the initial results of researchers of influence of low frequency electromagnetic fields on the behavior of the grey seal. The research defines the frequency characteristic field when exposed to which changes in the behavior of the animal most deviate from the background values. The methodology of the experiment and the criteria of evaluation of changes in the behavior of grey seal in response to exposure to electromagnetic fields with extremely low frequency characteristics work up.

Введение

В настоящее время стало ясно, что независимо от того, каким именно образом осуществляется магниторецепция, геомагнитное поле следует рассматривать как фактор окружающей среды, имеющий потенциальную значимость для различных таксономических групп (Киршвинк, Джонс, Мак-Фадден, 1989). Интерес к электромагнитным полям с низкими и сверхнизкими частотными характеристиками обусловлен тем, что эти частоты попадают в диапазон собственных колебаний биотоков, генерируемых в организмах животных. Большинство эффективных для воздействия на живой организм частот ЭМП находятся в интервале 0,01—60 Гц, поскольку оказывают влияние на процессы, происходящие на клеточном и молекулярном уровнях, совпадают с собственными ритмами функционирования головного мозга, нервной системы, сердца и других систем организма.

Арктические ластоногие подвержены воздействию мощных электромагнитных полей с различными пространственно-временными и частотно-амплитудными характеристиками, из-за близости их мест обитания к магнитному полюсу. Интенсивность магнитных бурь и естественных колебаний геомагнитного поля в этом регионе на порядок превосходит показатели экваториальных областей (Паркинсон, 1986). Одной из первых ответных реакций организма животного на возникающие изменения параметров абиотических факторов, в том числе и электромагнитного поля, является изменение в его поведение.

Специалисты ММБИ КНЦ РАН и ПГИ КНЦ РАН создали экспериментальный стенд для изучения влияния низкочастотных электромагнитных полей (нчЭМП) на поведение настоящих тюленей. Цель данных исследований - получение первичных данных о возможности выявления изменений в поведении настоящих тюленей при воздействии на их организм ЭМП с различными частотными характеристиками.



Рисунок 1. Исследуемые животные - две половозрелые самки серого тюленя

 $^{^{1}}$ ФГБНУ "Полярный геофизический институт", Мурманск, Россия 2 ФГБУН «Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН», Мурманск, Россия 3 УО «Гродненский государственный университет имени Я. Купалы», Гродно, Беларусь e-mail: xloroplast@mail.ru

Объект и методы исследования

Объект исследования – две половозрелые самки серого тюленя (*Halichoeru sgrypus* Fabricius, 1791), в возрасте 9 лет (рис. 1). Исследования проводились в аквариальной, оборудованной бассейном с объемом чаши 35 куб.м. (рис. 2). По периметру борта чаши располагалась излучающая нчЭМП антенна, подключенная к задающему генератору, установленному в аппаратной.

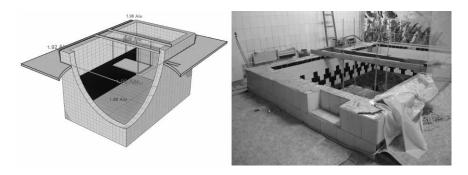


Рисунок 2. План-схема и фотография бассейна аквариальной с излучающей нчЭМП антенной.

Искусственное магнитное поле генерировалось с помощью экспериментального источника ЭМП разработанного сотрудниками ПГИ КНЦ РАН ($Tepeщenko\ u\ \partial p$., 2008). В состав источника ЭМП входят задающий генератор с перестраиваемой несущей частотой в диапазоне от 0,01 Γ ц до 36 Γ ц и излучающая антенна, огибающая бассейн по периметру, образуя горизонтальную рамку (рис. 3).



Рисунок 3. Аппаратная с задающим нчЭМП генератором, излучающей антенной и системой видеофиксации.

Наблюдение за животным осуществлялось камерой наружного наблюдения (WAT-137LH с объективом TG2Z3514FCSComputar 1/3", 3.5-8,0 мм, APД-DD, 77°-35°). Видеоматериал записывался на персональный компьютер. Видеонаблюдение велось с 13:00 до 16:00 на протяжении 26 дней. Другое оборудование располагались в отдельном помещении, контакт животного с человеком во время экспериментов исключен. Экспериментальные данные получены с использованием метода сплошного протоколирования — (непрерывная полная запись всех действий животного) и метода регистрации отдельных поведенческих проявлений (Попов, Ильченко, 1990). Продолжительность воздействия на животное нчЭМП составляла 20 минут, во время второго часа наблюдения, для каждого дня проведения эксперимента, кроме дней фоновых наблюдений. Фоновые значения представляют собой усредненный результат за 4 дня наблюдений. При анализе учитывались следующие поведенческие проявления: нахождение животного под водой, нахождение животного на поверхности, выход на помост, специфические позы и движения.

Была проведена серия экспериментов по воздействию ЭМП с частотами 0,01; 0,1; 1; 2-36 Гц с шагом в 2 Гц на тюленя. Повышение частоты ЭМП происходило последовательно, от 0,01 до 36 Гц. Период наблюдения за животным, составлял 3 часа и был разбит на три временных отрезка, по 1 часу. Первый час наблюдения был фоновым (до воздействия ЭМП). Непосредственное воздействие на животное нчЭМП осуществлялось со второго часа наблюдения. Третий час отражал динамику в поведении животного после воздействия искусственного ЭМП, то есть животное возвращалось в зону с естественными характеристиками.

Результаты и обсуждение

В литературе практически отсутствуют данные по оценке влияния НЧ электромагнитных полей на представителей отряда ластоногих (*Pinnipedia*). Наиболее целесообразным и простым в использовании неинвазивным методом изучения реакции организма животного в ответ на изменения условий среды является метод наблюдения. Акты всплытия-погружения физиологически закреплены в общей картине поведения ластоногих, поскольку продиктованы необходимостью дыхания животных. Основным критерием оценки изменения поведения животного был выбран показатель частоты всплытий в минуту, отражающий активность животного в данный промежуток времени. На рис. 4 представлены данные, отражающие усредненное количество всплытий в минуту за каждый из трех временных отрезков.

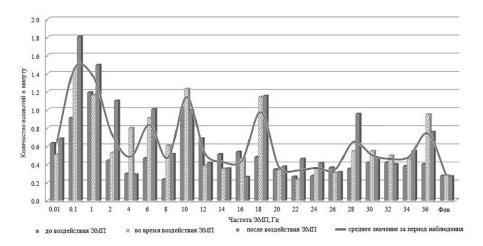


Рисунок 4. Усредненные значения всплытий, совершаемых тюленем за одну минуту.

До воздействия ЭМП, параметр частоты всплытий в минуту значительно варьировал, достигая максимальных значений в экспериментах с генерируемыми частотами 1 и 10 Гц (1,19 и 1,03 актов в минуту соответственно). Минимальные показатели отмечались при фоновых наблюдениях (0,27 акта в минуту) и в экспериментах с частотами 22 и 24 Гц (0,26 и 0,27 акта в минуту соответственно).

Во время воздействия низкочастотного ЭМП, количество всплытий значительно изменялось от эксперимента к эксперименту и носило волнообразный характер (рис.2). Максимальные значения наблюдались при частотах 0,1; 10 и 18 Гц (1,46; 1,23 и 1,14 акта в минуту, соответственно). Минимальное количество всплытий было зафиксировано при генерации частот ЭМП в 22-26 Гц (0,23-0,35 акта/мин), а также при фоновых наблюдениях (0,28 акта/мин).

Третий час наблюдений характеризовался тремя основными типами изменений в поведении тюленя. Первый – количество актов всплытий за минуту возрастало до уровня, что и при воздействии низкочастотных ЭМП. Второй – количество всплытий увеличивалось в 1,5-2,5 раза, по сравнению с периодом воздействия (0,01-2 Гц; 18 Гц; 28 Гц). Третий – количество актов всплытия в минуту снижалось в 0,5-1,5 раза, по сравнению с периодом воздействия нчЭМП (4, 8, 16, 36 Гц). Во время фоновых наблюдений данный показатель находился практически на одном уровне до, во время и после воздействия нчЭМП.

Важно отметить, что именно в течение периода воздействия на подопытное животное электромагнитных полей с частотами 4-12 Гц; 16-18 Гц; 32-36 Гц отмечались нехарактерные поведенческие акты, а именно: увеличение числа выходов на помост; тюлень, опираясь на хвост, вытягивал голову над водой; животное топорщило вибрисы и совершало движения челюстями, напоминающими укус. В отсутствие искусственного нчЭМП, подобных поведенческих актов не зарегистрировано.

На рис. 5,6 приведены ритмограммы, отражающие количество актов всплытия-погружения и их продолжительность, для каждого из трех часов наблюдения, при воздействии на тюленя электромагнитных полей с частотами 2 Гц, 18 Гц и 36 Гц, а также фоновая ритмограмма. Акцент именно на эти частоты обусловлен ростом активности животного во втором и третьем часе наблюдения более чем в два раза по сравнению с первым часом наблюдения, а также значительным отклонением рассчитанных показателей от фоновых. Детальное рассмотрение ритмограмм позволяет выделить периоды отдыха и активности животного, а также интенсивность процесса перехода из одного состояния в другое.

В течение 3-х часового периода наблюдения, отчетливо прослеживается следующая модель поведения: период до воздействия ЭМП характеризуется относительно равномерным числом актов всплытий-погружений и низкой активностью животного; во время воздействия ЭМП активность животного возрастала, среднее время его нахождения на поверхности увеличивалось; в период после окончания воздействия ЭМП у тюленя наблюдалось постепенное затухание активности, уменьшение числа актов

всплытий, намечается тенденция к стабилизации поведенческих реакций. Напротив, при рассмотрении фоновой ритмограммы, на протяжении всех трех часов, наблюдается стабильно низкая двигательная активность животного, не сопровождающаяся резкими увеличениями количества актов всплытий.

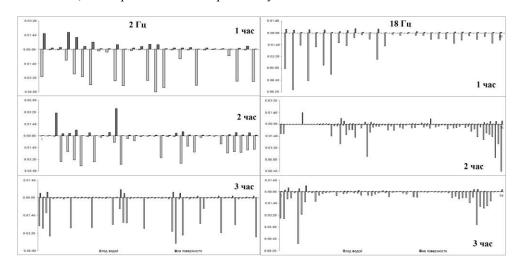


Рисунок 5. Ритмограмма всплытий-погружений тюленя в течение 3-х часов наблюдения при воздействии на него ЭМП с частотой 2 и 18 Гц.

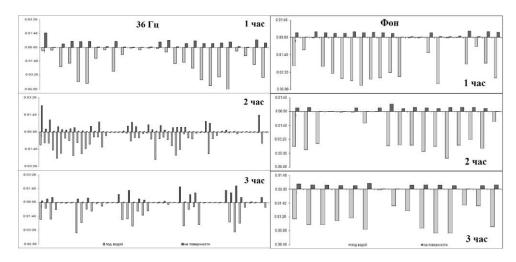


Рисунок 6. Ритмограмма всплытий-погружений тюленя в течение 3-х часов наблюдения, при воздействии на него ЭМП с частотой 36 Гц и результаты «мнимого воздействия» (фон).

Заключение

Наблюдение неспецифических поведенческих актов и данные о количестве актов всплытий в минуту позволили выделить ряд частот (2 - 8 Γ ц; 16 - 20 Γ ц; 34 - 36 Γ ц), при воздействии которых наблюдались значительные отклонения рассчитанных показателей от их фоновых значений. Проведенные эксперименты показали, что при генерации ЭМП с частотными характеристиками 2 - 8 Γ ц, 16 - 20 Γ ц, 34 - 36 Γ ц наблюдается рост возбуждения животного, возникают специфические поведенческие акты.

- 1. Киршвинк Дж., Джонс Д., Мак-Фадден Б. Биогенный магнетит и магниторецепция, Т 2. М.: Мир, 1989. 522 с.
- 2. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 525 с.
- 3. Попов С.В., Ильченко О.Г. Методические рекомендации по этологическим наблюдениям за млекопитающими в неволе. М.: Изд. Моск. Зоопарк: 1990. 77 с.
- 4. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Селиванов В.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора "Энергия-2" для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы, 2008, Т. 44, № 4. С. 43-66.

СИСТЕМА АВРОРАЛЬНЫХ КАМЕР МАІN

Б.В. Козелов

Полярный геофизический институт, Anamumы (e-mail: boris.kozelov@gmail.com)

Система авроральных камер MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) работает в г. Апатиты, Мурманская область. Система состоит из четырех камер, установленных попарно в двух точках, разнесенных на \sim 4 км по долготе, см. схему.

Научные задачи и проблемы

- 1. Скейлинг в пространственной структуре полярных сияний. (Свойства турбулентности магнитосферно-ионосферной плазмы).
- 2. Пространственно-временная структура пульсирующих полярных сияний. (Взаимодействие волн и частиц в магнитосферно-ионосферной системе).
- 3. Вертикальный профиль свечения в лучистых структурах. (Строение источников электрических полей и энергичных частиц в области ускорения).

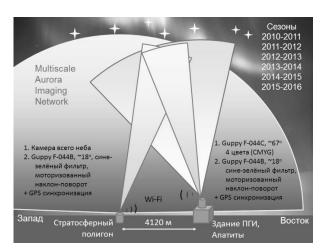


Схема системы авроральных камер MAIN

Компоненты и характеристики

	Камера	Интерфейс	Объектив	Поле зрения	Положение	Разрешение
AS	LCL-902H2 (WAT-902K) или L-811K	Аналоговое ТВ с видео- захватом	FujinonYV2.2x1.4A- SA2	180°	67°34' N, 33°18' E	232x232 (290x288), 12 бит, 1с
G1	AVT Guppy F-044BNIR	IEEE 1394a	FujinonHF25HA-1B, сине-зеленый фильтр C3C21	15°x10° 18°диаг.	67°34' N, 33°18' E	376х288 8(12) бит,1с
G2	AVT Guppy F-044BNIR	IEEE 1394a	FujinonHF25HA-1B, сине-зеленый фильтр C3C21	15°х10° 18°диаг.	67°34' N, 33°24' E	376х288 8(12) бит,1с
GC	AVT Guppy F-044CNIR	IEEE 1394a	FujinonDF6HA-1B	56°х44° 67°диаг.	67°34' N, 33°24' E	376х290 4 цвета СМҮС, 8(12) бит,1с

Возможности системы:

- одновременные наблюдения на 3 масштабах (поля зрения -180° , 68° и 18°),
- GPS синхронизация и патрульный режим работы всех камер,
- в реальном времени представлены на web-сайте http://aurora.pgia.ru
- 2 пары для триангуляции: с базой 4 км в Апатитах и с базой 86 км Апатиты-Ловозеро.

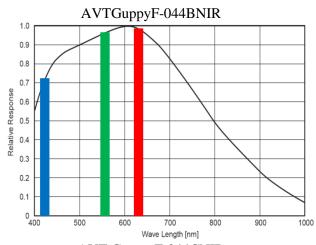
Данные и доступ:

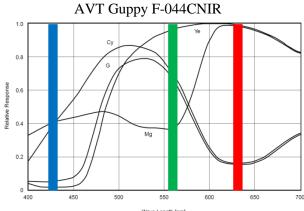
Level 0: исходные данные, 1 кадр/с – доступ по запросу. Объём: G1 и G2 \sim 370 Мб/час, GC \sim 1.5 Гб/час, AS \sim 740 Мб/час.

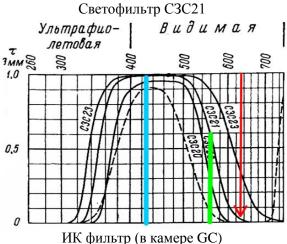
Level 1:кеограммы и отдельные кадры через 10 с в свободном доступе: http://aurora.pgia.ru/archive.html

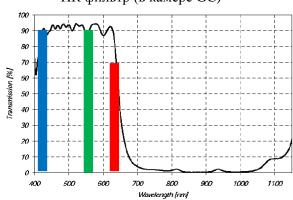
Level 2: отобранные интервалы с полярными сияниями в поле зрения, avi-фильмы, кеограммы: http://aurora.pgia.ru/events/

Спектральные характеристики

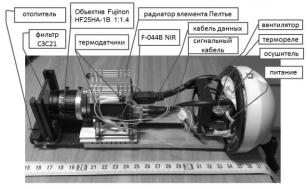








Внутреннее устройство камеры Guppy-1



Статистика наблюдений

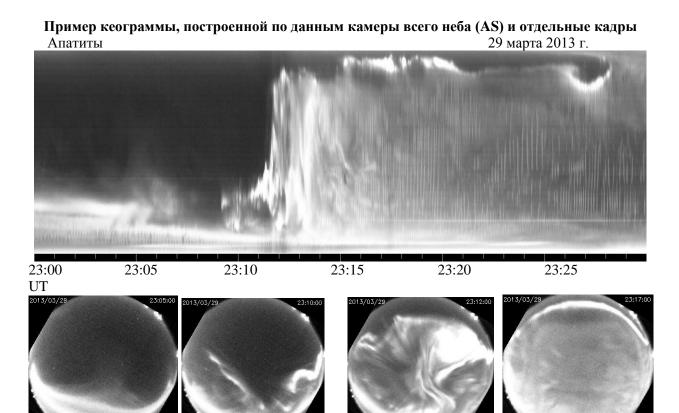
Система работает с 2010 г. В среднем за сезон с сентября по апрель насчитывается около 220 часовых интервалов, во время которых полярные сияния попадают в поле зрения камер. Детализация по камерам и по типам наблюдаемых явлений приведена в таблицах.

Число часовых интервалов с авророй

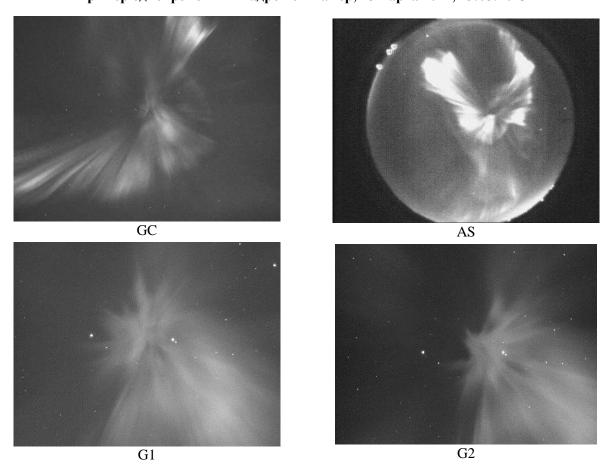
Сезон	Всего	AS	GC	G1	G2	G1+ G2	сЛово- зеро
2013 - 2014	222	222	58	54	34	29	110
2012 - 2013	225	225	70	82	95	78	128
2011 - 2012	210	178	110	85	86	64	95

События за 2012-2014 гг.

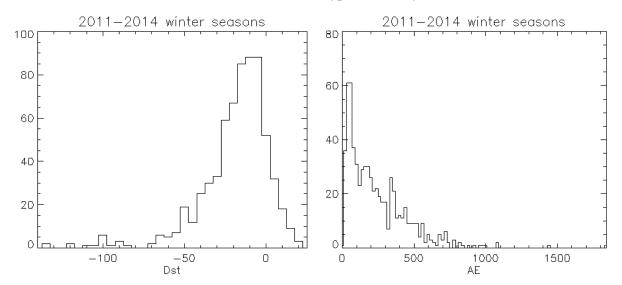
Пульсации на севере поля зрения	242
Дуги в зените GC	55
Возможна триангуляция по G1 и G2, где:	107
- лучи	25
- пульсации	42
- N-S структуры	28
Одновременно с Ловозеро	238



Пример одновременных кадров с 4 камер, 25 марта 2014, 23:05:20 UT



Статистика наблюдений от уровня возмущенности



- 1. Kozelov B.V., et al.: Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010–2011 // Geosci. Instrum.Method.Data Syst., 1, 1–6, 2012, www.geosci-instrum-method-data-syst.net/1/1/2012/doi:10.5194/gi-1-1-2012.
- 2. AVT Guppy. Technical Manual V7.1.0. Allied Vision Technologies GmbH, Germany. 2009.
- 3. Kozelov B.V., et al.: Practice of CCD cameras' calibration by LED low-light source // "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXVI Annual Seminar, Apatity, pp. 151 154, 2013.
- 4. Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P., Yurov V.E. On triangulation by auroral cameras // "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXVAnnualSeminar, Apatity, pp. 41 44, 2012.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ АВРОРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

М.В. Кузнецова, С.В. Пильгаев, А.В. Ролдугин (ФГБУН Полярный геофизический институт, Anamumы, Poccus.) e-mail: pilgaev@pgia.ru

Аннотация. Представлены оптические приборы для наблюдения авроральных явлений, размещеные в обсерваториях ПГИ «Ловозеро» и «Баренцбург»: камеры всего неба, эмиссионные имажеры, меридиональные спектрометры.

Abstract. Optical instruments for observation of aurora are presented. Instruments are placed in observatories of PGI «Lovozero» and «Barentsburg»: all-sky cameras, emission imagers, meridional spectrometers.

Введение

Важным средством диагностики состояния верхних слоев атмосферы и околоземного космического пространства являются оптические методы. Исследования аврорального свечения позволяет оценить поля, потоки и энергии частиц в околоземном пространстве. Для проведения оптических наблюдений авроральных явлений в ПГИ используются, в числе прочих, и аппаратные комплексы, описанные ниже. Один из них функционирует в обс. «Ловозеро» (35.01E, 67.98N), расположенной в авроральной зоне; другой – в обс. «Баренцбург» (14.21E, 78.09N), расположенной в зоне полярного каспа.

Состав, назначение и характеристики оптических приборных комплексов

В обсерваториях используется комплект приборов, включающий в себя: камеры всего неба (КВН), эмиссионные имажеры (ЭИ), меридиональные спектрометры (МС). Характеристики приборов задавались таким образом, чтобы создавать однородные, взаимодополняющие наблюдательные комплексы.

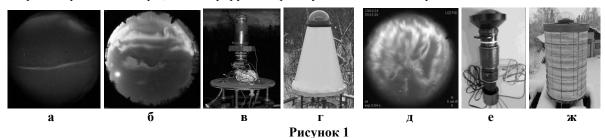
Для иследования морфологии и динамики полярных сияний используются КВН, работающие в интегральном свете видимого диапазона длин волн.

В обсерватории «Ловозеро» используется спарка КВН: с высоким угловым разрешением (ВУР), ориентированная на исследования морфологии аврорального свечения, RGB формат камеры позволяет проводить предварительные спектральную/альтитудную селекцию данных и с высоким временным разрешением (ВВР) предназначена, главным образом, для изучения авроральных пульсаций. Камеры синхронизованы через систему GPS. Чувствительности этих КВН отрегулированы для перекрытия максимального диапазона наблюдаемых интенсивностей аврорального свечения. Параметры КВН обс. «Ловозеро» приведены в табл. 1.

Таблина 1

	ВУР	BBP	
поле зрения (град)	180		
формат кадра (пикс х пикс)	2816x2816	512x512	
макс. угловое разрешение (град/пикс)	0.064	0.33	
макс. временное разрешение (сек)	2 (0.04 при 8бит/пикс)	0.1	
порог чувствительности (рэлей)	100	50	
разрядность АЦП (бит)	14	16	
миним. рабочий зенитный угол Солнца (град)	93	96	
точность привязки к мировому времени (мсек)		1	
рабочий спектральный диапазон (нм)	400÷700	380-900	
тип данных	RGB	чёрно-белый	

На рис. 1 приведены кадры, демонстрирующие работу КВН обс. «Ловозеро» и их внешний вид.



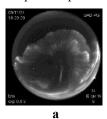
- а одиночная дуга в диффузной мантии, 1-й балл (ВУР), б активная фаза суббури, 2,5 балла (ВУР),
- в КВН(ВУР), д размещение КВН(ВУР) в гермоконтейнере,
- г пульсации в утреннем секторе (BBP), е КВН(ВВР), ж размещение КВН(ВВР) в гермоконтейнере.

Универсальная КВН обс. «Баренцбург» эксплуатируется в помещении, её параметры представлены в табл. 2

Таблица 2

поле зрения (град)	180
формат кадра (пикс х пикс)	540x540
макс. угловое разрешение (град/пикс)	0.33
макс. временное разрешение (сек)	1
порог чувствительности (рэлей)	150
разрядность АЦП (бит)	14
мин. рабочий зенитный угол Солнца (град)	96
точность привязки в мировому времени (мсек)	1
рабочий спектральный диапазон (нм)	400÷780
тип данных	чёрно-белый

На рис. 2 приведены кадры демонстрирующий работу КВН обс. «Баренцбург» и её внешний вид.



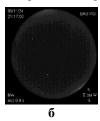




Рисунок 2

- а. полярное сияние 2-го балла
- б. свечение ночного неба
- в. внешний вид КВН в контейнере оптического модуля обс. «Баренцбург»

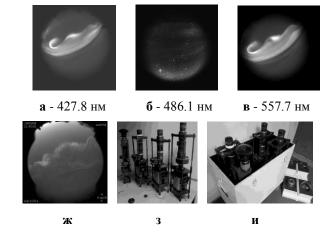
Для измерения интенсивностей аврорального свечения значимых эмиссий, по всей небесной полусфере используются ЭИ позволяющие получать квазимонохроматические (определяемые шириной полосы пропускания используемых интерференционных светофильтров) изображения, с чувствительностью, позволяющей регистрировать фоновое свечение ночного неба, при умеренном (1-10сек) темпе следования кадров. Величины и соотношения интенсивностей регистрируемых эмиссий позволяет оценивать потоки и энергии вторгающихся частиц.

В обс. «Ловозеро» эксплуатируется мультиспектральный ЭИ (МЭИ), обеспечивающий синхронную съёмку всего неба в 4-ёх авроральных эмиссиях (до 8 эмиссий в асинхронном режиме). /1/ Оснащение канала 557.7 нм интерференционным светофильтром с узкой полосой пропускания допускает проведение наблюдения полярных сияний в светлое время суток. Параметры МЭИ приведены в табл. 3.

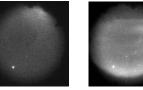
Таблица 3

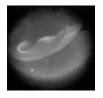
рабочие спектральные каналы (нм) (резервные, несинхронные)	427.8	486.1 (656.3)	557.7	630.0(589.3)	
поле зрения (град.)		18	80		
формат кадра (пикс.х пикс.)		512 x 512			
угловое разрешение (град./ пикс.)		0.3	33		
временное разрешение (сек.)	10	10	1	10	
ширина полосы пропускания светофильтра (нм)	1.8	3.0 (5.0)	0.8	2.5 (3.2)	
порог чувствительности (рэлей)	100	100 (50)	50	30	
разрядность АЦП (бит)		16			
минимальный рабочий зенитный угол Солнца (град.)	96	96	90	96	
точность привязки к мировому времени (милисек)		1	1		

На рис. 3 приведены кадры, демонстрирующие работу МЭИ по полярному сиянию интенсивностью 2 балла.









г - 589.0/6 нм д - 630.0 нм

е - 656.3 нм

Рисунок 3

ж – работа канала 557.7нм МЭИ, светлое время суток, лучистая дуга полярного сияния освещённая Солнцем.

конструктивное исполнение МЭИ обс. «Ловозеро»

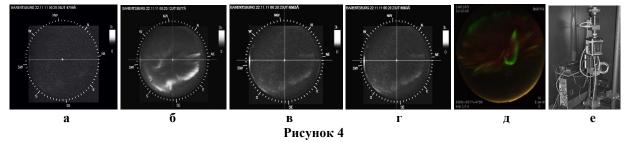
- з эмиссионные камеры прибора,
- и гермобокс МЭИ.

Для обс. «Баренцбург» разработан ЭИ, являющийся гиперспектральной камерой с жидкокристаллическим светофильтром. /2/ Высокая скорость переключения спектральных полос и их произвольная выборка, позволяет производить последовательное сканирование избранных рабочих эмиссий с темпом, определяемым только необходимыми временами экспозиции. Параметры гиперспектрального ЭИ обсерватории «Баренцбург» представлены в табл. 4.

Таблица 4

рабочие спектральные каналы (нм)	произвольные в диапазоне 420-720нм
поле зрения (град.)	180
формат кадра (пикс.х пикс.)	512 x 512
угловое разрешение (град./ пикс.)	0.33
временное разрешение (сек.)	1-15
ширина полосы пропускания светофильтра (нм)	7
порог чувствительности (рэлей)	50
разрядность АЦП (бит)	16
Миним. рабочий зенитный угол Солнца (град.)	98
точность привязки к мировому времени (милисек)	1

На рис. 4 показаны кадры ЭИ обс. «Баренцбург» в четырёх наиболее значимых рабочих эмиссий и синтезированное на основе трёх эмиссионных кадров цветное изображение.



а -470.9нм, **б** - 557.7нм, **в** - 630.0нм, **г** - 656.3нм, д — сияние в дневном секторе обс. «Баренцбург», синтетическое изображение 4709+5577+6300, **е** — внешний вид ГЭИ в контейнере оптического модуля обс. «Баренцбург».

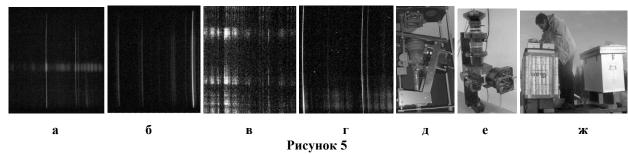
Для исследования спектрального состава аврорального свечения, измерения его абсолютной интенсивности и общей динамики авроральных явлений в широком спектральном интервале используются МС.

В обс. «Ловозеро» используется пара МС; для видимого диапазона (VIS) /3/ и ближнего инфракрасного диапазона (NIR). /4/ Спектрометры относятся к классу т.н. изображающих спектрометров, получаемое прибором двухмерное изображение несёт по одной из своих осей информацию о спектральном распределений наблюдаемого свечения, по другой - информацию о угловом распределений этого свечения вдоль местной дуги вертикала. Ориентация рабочих дуг вертикала приборов - вдоль геомагнитного меридиана обсерватории. Каждый из приборов может работать в двух режимах: стандартном, с широким спектральным диапазоном, с узким спектральным диапазоном и высоким (удвоенным) спектральным разрешением (в этом режиме рабочий диапазон «длинноволнового» канала смещён в видимую область спектра (VIS-NIR)). Возможно оперативное переключение режимов в ходе наблюдений. Для VIS-NIR спектрометра также предусмотрен режим «сверхвысокого разрешения», с узкой (40-50 нм) рабочей спектральной областью, в диапазоне 460-680нм, обеспечивающий спектральное разрешение до 0.02 нм, предусматривающий замену дифракционной решётки с установкой её для работы в высоких порядках спектра. Оперативный перевод в данный режим невозможен. Параметры меридионального спектрометра приведены в табл. 5.

Таблица 5

		таолица з		
	VIS	VIS-NIR		
рабочий спектральный диапазон (нм)	415-695 (стандартн. режим)	673-873 (стандартн. режим)		
	415-565 (узкополосн. режим)	550-665 (узкополосн. режим)		
поле зрения (град.)	180 x	0.125		
формат кадра (пикс.х пикс.)	360 x 3056	360 x 2184		
угловое разрешение (град./ пикс.)	0.	0.5		
временное разрешение (сек.)	15	30		
спектральное разрешение (нм/пикс)	0.1 - стандартн. режим (C	0.05 - узкополосн. режим)		
порог чувствительности (рэлей)	20	25		
разрядность АЦП (бит)	16			
миним. рабочий зенитный угол Солнца град.)	0			
точность привязки к мировому времени	1			
(мсек)				

На рис. 5 приведены кадры работы меридиональных спектрометров.



- а спектр дуги полярного сияния в зените, VIS, стандартный режим 415÷695нм
- 6 спектр полярного сияния (по всему небу), VIS, узкополосный режим 415÷565нм
- в спектр дуг полярного сияния, NIR, стандартный режим 673÷873нм
- г спектр дуги полярного сияния у южного горизонта, VIS-NIR, узкополосный режим 550÷665нм
- д внешний вид МС VIS
- е внешний вид MC NIR
- ж гермобокс VIS и NIR MC (правый) и МЭИ (левый) на крыше оптического павильона в обс. «Ловозеро»

Для обс. «Баренцбург» изготовлен одноканальный МС, видимой области спектра, того же класса изображающих спектрометров. Прибор эксплуатируется в помещении, его параметры приведены в табл. 6.

Таблица 6

рабочий спектральный диапазон (нм)	420-780
поле зрения (град.)	180 x 0.125
формат кадра (пикс.х пикс.)	360 x 1080
угловое разрешение (град./ пикс.)	0.5
временное разрешение (сек.)	60
спектральное разрешение (нм/пикс)	0.34
порог чувствительности (рэлей)	50
разрядность АЦП (бит)	16
минимальный рабочий угол погружения Солнца (град.)	96
точность привязки к мировому времени (милисек)	1

На рис. 6 показаны спектры МС обс. «Баренцбург» и его внешний вид.

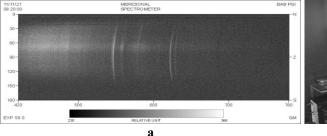




Рисунок 6

- **а**. Спектр свечения неба, обс. «Баренцбург», вблизи местного полдня, полярной ночью.
- **б.** Общий вид меридионального спектрометра обс. «Баренцбург».

Заключение

Эксплуатируемые в обсерваториях ПГИ «Ловозеро» и «Баренцбург» комплексы оптических приборов обеспечивают полное освещение общей авроральной обстановки.

- 1.А. В. Ролдугин, В. Г. Воробьев, В. К. Ролдугин, С. А. Черноус. Наземные наблюдения полярных сияний в условиях солнечной подсветки. Геомагнетизм и аэрономия, 2010, том 50, № 1, с. 37–434.
- F. Sigernes, Yu. Ivanov, S. Chernouss, T. Trondsen, A. Roldugin, Yu. Fedorenko, B. Kozelov, A. Kirillov, I. Kornilov, V. Safargaleev, S. Holmen, M. Dyrland, D. Lorentzen, and L. Baddeley. Hyperspectral all-sky imaging of auroras. OPTIC Express. 2012
- 3. Ролдугин А.В., Федоренко Ю.В, Шароварова О.М., Пильгаев С.В., Дашкевич Ж.В. Меридиональный спектрометр. // Приборы и техника эксперимента, 2007, V. 50, No5, c. 130-137.
- 4. A.V. Roldugin, Zh.V. Dashkevich, O.M. Lebed, Yu.V. Fedorenko, and S.V. Pilgaev Infrared Spectrometer: Design and Preliminary Results. Atmospheric and Oceanic Optics, 2011, Vol. 24, No. 6, pp. 566–571.

АНТЕННЫЕ ИННОВАЦИИ ДЛЯ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В.И. Милкин 1 , П.А. Быченков 2

¹PuPTKC MГТУ, Мурманск (e-mail: milkinvi@mstu.edu.ru)

Аннотация. Рассмотрены широкоиспользуемые антенны круговой поляризации. Представлено инновационное решение для антенн круговой поляризации, а также результаты моделирования его работы в программе MMANA-GAL. По результатам моделирования были определены основные параметры антенного устройства.

Abstract.Widelyusedcircularpolarizationantennashavebeenanalyzed. An innovative solution for the circular polarization antenna and simulation results in program MMANA-GAL have been presented. During the simulation the main parameters of the antenna device were determined.

Введение

Проблемы радиосвязи в сложных условиях распространения радиоволн не только имеют место на современном этапе развития электросвязи, но и не исключаются и в будущем, из-за количественного увеличения радиоизлучающих средств. С одной стороны, в городских условиях, где увеличение числа устройств, использующих электромагнитные волны, в совокупности с большим количеством габаритных проводящих конструкций зданий и сооружений, способствуют как увеличению уровня помех, так и частым переотражениям радиоволн на участках отдельных радиолиний. С другой стороны, обеспечение радиосвязью труднодоступных областей, таких как леса, сильно пересекающиеся местности и горные массивы, так же затрудняется из-за сложных электромагнитных условий. Переотражения радиоволн, происходящие в областях со сложной электромагнитной обстановке, изменяют плоскость линейно поляризованной волны, вызывая срывы связи и глубокие поляризационные замирания при приеме-передаче радиосигналов антеннами линейной поляризации. Выходом из рассмотренных ситуаций и решением описанных проблем может служить использование радиоволн с круговой поляризацией, которую могут реализовать особые антенны, принимающие и излучающие такие радиоволны [1].

Круговая поляризация органически «отфильтровывает» переотражённые радиоволны, так как происходит изменение направления вращения поляризации, и их антенна противоположной стороны вращения поляризации не принимает, и также увеличивает дальность электромагнитной доступности, так как при прохождении через линейно поляризованные экраны теряет не более 50% энергии. Применение круговой поляризации выгодно, когда необходимо обеспечить прием волн вертикальной, горизонтальной или наклонной поляризации или когда происходит её изменение во времени. Это означает, что антенны круговой поляризации обладают свойством универсальности, так как позволяют принимать волны произвольной линейной поляризации, но лучше всего подходят для приема идентичных радиоволн, поляризованных по кругу [2].

Широкоприменяемые антенны круговой поляризации

Различные типы антенн круговой поляризации обладают своими недостатками. Например, наиболее распространенная классическая антенна круговой поляризации - турникетная антенна требует симметрирования и согласования, то есть обладает усложнённой системой питания. К тому же турникетные антенны относительно узкополосные из-за частотной зависимости узлов питания и резонансной настройки директорных структур [2]. Другим примером распространенной антенны круговой поляризации является классическая спиральная антенна. Недостатком спиральных антенн являются необходимость создания не менее 3 витков для работы с круговой поляризацией, необходимость использования согласующего устройства, влияние затуханий при конструкции антенны с количеством более 7 витков, сложность пространственной конструкции при реализации и увеличенные продольные габариты.

Целью данного исследования являлась разработка компактной антенны круговой поляризации увеличенной направленности, расширяющей парк средств данного назначения с повышенными характеристиками.

Прототип разработанного антенного устройства

В качестве отправной модели взято конструктивное решение укороченной УКВ-антенны, описанной в одноимённой статье в журнале «Радио» №7 за 2015 год (рис. 1) [3], защищённое патентом [4]. Работа треугольно-петлевого вибратора, раскрытая в материалах статьи, как и техническое решение, являющееся

²МИ МГТУ, Мурманск (e-mail: 33806@mail.ru)

объектом интеллектуальной собственности МГТУ, являются оптимальными для антенных устройств при синтезе антенных систем.

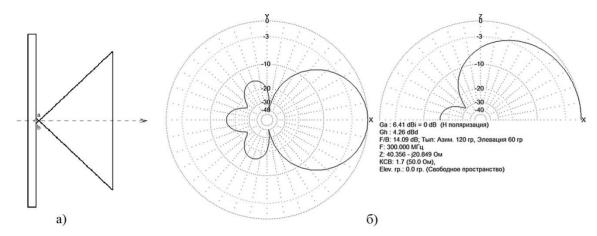


Рисунок 1. Треугольно-петлевой вибратор – отправная модель для разработанной инновационной антенны круговой поляризации: **a** – геометрия, **б** – диаграмма направленности.

Инновационная антенна круговой поляризации

Антенны с круговой поляризацией являются в ряду перспективных разработок частным случаем. Однако при аналитическом подходе, на базе рассмотренных исследований, могут иметь место и индивидуальные версии, отражающие особенности работы антенн с круговой поляризацией. Например, если использовать особенности устройства турникетных антенн круговой поляризации и спиральных антенн с отражателем, то есть с рефлектором, то не исключается их комбинация при совмещении двух в одном. То есть, если над рефлектором-экраном установить дуги полувибраторов идентично разомкнутым частям шлейфов Пистолькорса, размещая их вокруг центра с углами 90°, то возможна реализация псевдотурникетного активного вибратора круговой поляризации с некоторыми параметрами, подобными ортогонально размещённым петлевым вибраторам. В свою очередь, дополняя конструкцию треугольными элементами подобно устройству в отправной модели, можно добиться эффектов, аналогичных в упомянутом изобретении.

Для достижения заявленных характеристик было проведено моделирование ряда устройств с круговой поляризацией, в которых соответствующие результаты были реализованы благодаря введению в исследуемые антенны четырех изогнутых вибраторов, расположенных во взаимно ортогональных плоскостях над экраном, каждый вибратор замкнут на экран, направлен по радиусу к центру антенны и возбуждён равноамплитудно с прогрессивным на 90° сдвигом по фазе (рис. 2, a, б).

По результатам моделирования определены параметры антенны при которых достигаются наилучшие характеристики антенны: вибраторы антенны выполнены длиной не менее 0,25 средней длины волны в виде дуговых элементов с линейными участками, параллельными экрану, при возбуждении концов, расположенных вблизи осевой линии, проходящей через центр антенны. На оси антенны параллельно экрану перед вибраторами во взаимно ортогональных плоскостях расположены линейные директоры, длиной 0,4 средней длины волны, кондуктивно соединённые от концов директоров проводниками, длиной 0,3 средней длины волны, с точками возбуждения концов вибраторов.

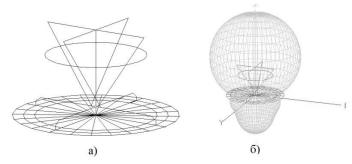


Рисунок 2. Инновационная антенна круговой поляризации: \mathbf{a} – геометрия, $\mathbf{б}$ – диаграмма направленности.

Компьютерная модель треугольно-дуговой антенны, была проверена в ходе электронного моделирования в программе MMANA на частоту 435 МГц с перекрытием рабочего диапазона частот 350 – 500 МГц. Результаты компьютерного моделирования, показаны на рис. 3.

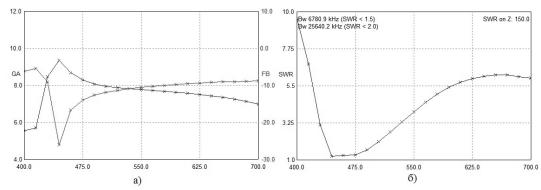


Рисунок 3. Инновационная антенна круговой поляризации: **а** – график изменения коэффициента усиления и коэффициента защитного действия, **б** – график изменения коэффициента стоячей волны.

Инновациями инновационной антенны круговой поляризации являются следующие:

- выполнение вибраторов дуговыми, длиной не менее 0,25 средней длины волны, с линейными участками параллельными экрану;
- возбуждении вибраторов с концов, расположенных вблизи осевой линии, проходящей через центр антенны:
- использование экрана составной частью вибратора в качестве активного рефлектора;
- дополнение диаграммообразующей структуры антенны линейными директорами длиной 0,4 средней длины волны, расположенными в взаимно ортогональных плоскостях на оси антенны параллельно экрану перед вибраторами (активным рефлектором);
- выполнением не менее, чем одного из диаметрально расположенных вибраторов трубчатым, с проложенным внутри коаксиальным кабелем, экран которого подключён к точке возбуждения конца вибратора, в котором проложен коаксиальный кабель, а центральный проводник коаксиального кабеля подключён к точке возбуждения конца противоположного вибратора;
- подключением не менее одного из ортогонально расположенных вибраторов со сдвигом по фазе на 90°. Благодаря всем этим характеристикам достигаются главные преимуществами инновационной направленной антенны, которыми являются простота изготовления, тиражирования, эксплуатации и в высоких электрических характеристиках в виде самостоятельной антенны, в возможности её использования на промышленной основе и конкурентоспособном уровне.

Заключение

В ходе проведённых исследований парка используемых антенн круговой поляризации и выбранного прототипа, с близкими параметрами антенн круговой поляризации, востребованными потребителями, синтезировано техническое решение инновационной антенны. Новизна предложений и их технический уровень предполагают патентоспособность созданного устройства антенны круговой поляризации.

- 1. Чернышов В.П., Антенно-фидерные устройства радиосвязи и радиовещания. М.: Связь, 1978
- 2. Ротхаммель К., Крише А. Антенны. Том 2: Пер. с нем. М.: 2005. 416 с.: ил. ISBN 5-85648-716-8
- 3. В. Милкин, Н. Калитёнков, В. Лебедев, А. ШульженкоУкороченная УКВ-антенна/ //Радио. 2015. №7 С. 59-63.
- 4. Пат. 2568340 Российская Федерация, МПК Н 01 Q 5/00. Активный антенный треугольно-петлевой элемент / Милкин В.И., Калитёнков Н.В., Шульженко А.Е.; заявитель и патентообладатель Мурман. гос. техн. ун-т -№ 2014121597; заявл. 27.05.2014; опубл. 10.01.1999, Бюл. № 32

УПРАВЛЕНИЕ ДИАГРАММАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ НА БАЗЕ WI-FI АДАПТЕРОВ

В.И. Милкин, Е.Г. Шубина, М.С. Татусяк

PuPTKC MГТУ, Мурманск (e-mail: milkinvi@mstu.edu.ru)

Аннотация. Проведено исследование Wi-Fi антенных адаптеров с целью выявления зависимости изменения форм диаграмм направленности от взаимного расположения элементов адаптеров. Приведены графики зависимости коэффициента усиления и коэффициента стоячей волны от углов раскрыва адаптеров. Проведено сравнение между электрическими характеристиками исследуемых адаптеров и штатной антенной.

Abstract. A research of Wi-Fi antenna adapters to identify dependence of changing forms patterns on the relative position of elements of adapters has been realized. Graphics of the dependence of the gain and the standing wave ratio of the aperture angle adapters have been given. A comparison between the electrical characteristics of the research adapters and standard antenna has been shown.

Введение

Работа любого беспроводного гаджета в сети Wi-Fi не мыслима без применения антенн, от которых зависит эффективность использования всего состава оборудования, задействованного для реализации функций предназначения. В системе функционирования беспроводных сетей важнейшей задачей является обеспечение электромагнитной доступности в любой точке заданного пространства, а также обеспечение электромагнитной экологии.

Компромиссным техническим решением данных задач явилось использование навесных пассивных конструкций, обеспечивающих перераспределение электромагнитной энергии в пространстве при использовании штатных ненаправленных антенн.

Целью данной работы является исследование диаграмм направленности Wi-Fi антенных адаптеров для получения улучшенных электрических параметров по сравнению со штатной антенной, а также обеспечения электромагнитной экологии.

Материалы и средства

Исследования по изучению Wi-Fi антенных адаптеров на данном этапе проводятся с использованием программного средства MMANA-GAL. Мы смоделировали макеты Wi-Fi антенных адаптеров:

- с пространственным размещением двух треугольно-петлевых элементов Милкина, разнесенных на расстояние лямбда/24 от штатной антенны, и двух директоров, также разнесенных на расстояние лямбда/9 от штатной антенны, изменяющими своё положение от 0 до 180 градусов относительно активного вибратора (далее по тексту Wi-Fi антенный адаптер №1);
- с двумя вибраторами и двумя треугольно-петлевыми элементами Милкина, разнесенными вдоль поперечной оси на расстояние λ/4, и изменяющими свое положение в пределах от 0 до 180 градусов относительно плоскости активного вибратора (далее по тексту Wi-Fi антенный адаптер №2)

с целью дальнейшего анализа полученных результатов в виде диаграмм направленности, коэффициентов усиления и коэффициентов стоячей волны.

На практике были созданы модели данных устройств, конструктивно выполненных из треугольно-петлевых элементов Милкина и директоров, заключенных в бумажном корпусе. Такое строение позволяет оперативно изменять форму диаграммы направленности, что очень удобно в практическом применении.

Результаты исследования

На рисунке 1 изображена пространственная (3D) диаграмма направленности Wi-Fi антенного адаптера №1. Это один из самых лучших вариантов расположения элементов данного устройства, при котором достигается наибольшее значение коэффициента усиления и наименьшее значение коэффициента стоячей волны.

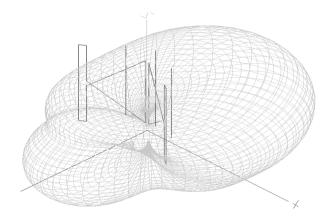


Рисунок 1. Диаграмма направленности Wi-Fi антенного адаптера №1 при угле между треугольнопетлевыми элементами 60° , между директорами -105°

Для более детального изучения изменения формы диаграммы направленности на рисунке 2 представлено наложение всех диаграмм направленности в горизонтальной плоскости.

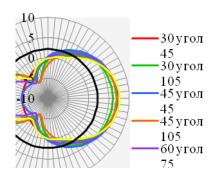


Рисунок 2. Горизонтальные диаграммы направленности Wi-Fi антенного адаптера №1

Изменение положения элементов Wi-Fi антенного адаптера №1 также влияет и на электрические параметры данного устройства, такие как коэффициент усиления и коэффициент стоячей волны. По результатам исследования был построен график зависимости данных параметров от углов раскрыва (рис. 3).



Рисунок 3. График зависимости коэффициента усиления и коэффициента стоячей волны от углов раскрыва между элементами Wi-Fi антенного адаптера №1

Из графика можно сделать вывод, что с каждым изменением угла раскрыва между треугольно-петлевыми элементами наблюдается резкий скачок коэффициента стоячей волны, затем его практически линейное спадание. В то же время коэффициент усиления ведет себя достаточно стабильно, а при угле 60° даже возрастает с увеличением угла раскрыва между директорами.

Для более полного представления о значимости проведенной работы и выгодности использования Wi-Fi антенных адаптеров нами также был проведен сравнительный анализ между обычной штатной антенной и антенной, оснащенной Wi-Fi антенными адаптерами. Так, на рисунке 2 можно увидеть горизонтальную диаграмму направленности штатной антенны (изображена черным цветом). Каких-либо направленных свойств она лишена в отличие от любой из представленных диаграмм направленности антенны с адаптером.

«Проигрывает» штатная антенна и по электрическим характеристикам (рис. 4): ее коэффициент стоячей волны выше, чем у антенны с Wi-Fi антенным адаптером №1, а коэффициент усиления в 2 раза меньше.

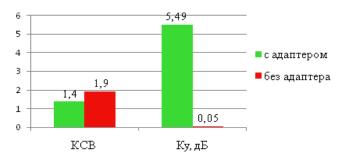


Рисунок 4. Сравнительный график электрических характеристик (коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны) штатной антенны (без адаптера) и антенны с Wi-Fi антенным адаптером N1

Второй исследуемый адаптер — это Wi-Fi антенный адаптер №2. Конструктивно он, так же как и предшественник, выполнен из двух треугольно-петлевых элементов Милкина и двух директоров. На рис. 5 изображена пространственная (3D) диаграмма направленности.

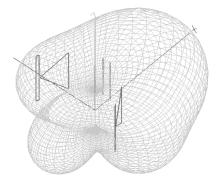


Рисунок 5. Диаграмма направленности антенны с Wi-Fi антенным адаптером №2 при угле раскрыва треугольно-петлевых элементов на 60°

Для наглядной демонстрации видоизменения диаграмм направленности они были наложены на одну плоскость с соблюдением масштабов (рис.б.). Напомним, что конструкции обеих моделей позволяют оперативно изменять формы диаграмм направленности.

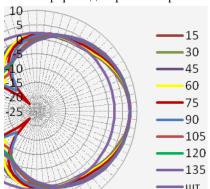


Рисунок 6. Диаграммы направленности Wi-Fi антенного адаптера №2 в горизонтальной плоскости

Следует отметить, что с изменением угла раскрыва элементов данного Wi-Fi антенного адаптера №2 изменяются его электрические характеристики. Ниже приведен график зависимостей коэффициента стоячей волны, отвечающего за свойства согласования (должен стремиться к единице) и коэффициента усиления, обеспечивающего направленные свойства рис. 7.



Рисунок 7. Сравнительный график коэффициента усиления и коэффициента стоячей волны штатной антенны (без адаптера) и антенны с Wi-Fi антенным адаптером №2

Как видно из представленного графика, коэффициент усиления стабилен во всем диапазоне углов раскрыва. Этот факт дает данному Wi-Fi антенному адаптеру №2 преимущество с точки зрения рядового пользователя, т. к. эта модель не требует точной настройки и установить ее сможет каждый. Также видно, что значения коэффициента стоячей волны ниже, чем у штатной антенны без адаптера почти в любом из взаимных положений элементов, исключая их критические углы раскрыва.

За счет определенного взаимного расположения элементов устройства достигнуто наилучшее для этой модели значение электрических параметров: коэффициента усиления и коэффициента стоячей волны. Сравнение полученных данных с параметрами штатной антенны изображено на рис. 8 в виде наглядного графика.

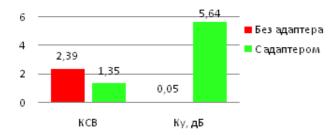


Рисунок 8. Сравнительный график электрических характеристик (коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны) штатной антенны (без адаптера) и антенны с Wi-Fi антенным адаптером №2

Из графика следует, что при использовании Wi-Fi антенного адаптера №2 пользователь получит на порядок лучшую согласованность, а также усиление сигнала примерно в 2 раза. Помимо улучшенных электрических характеристик по сравнению со штатной антенной потребитель получит возможность оперативно подобрать диаграмму направленности под конкретное помещение, тем самым улучшив электромагнитную обстановку.

Заключение

За счет внедрения Wi-Fi антенных адаптеров производится перераспределение излучаемой мощности, что при одних и тех же характеристиках гаджетов увеличивает их дальность действия или площадь покрытия не менее чем в 2 раза, позволяет отказываться от дублирующих устройств, снижает стоимость развертываемых беспроводных сетей и суммарное воздействие электромагнитного поля на окружающую среду.

- 1. Н. Калитёнков, В. Лебедев, В. Милкин, А. Шульженко Антенный адаптер для повышения эффективности функционирования беспроводных сетей / Радио. 2015. № 1.
- 2. Н. В. Калитенков, В. И. Милкин Треугольно-петлевой активный вибратов для инновационных антенн / Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке: XIII Междунар. Науч.-практ. конф., Россия, Москва, 30-31 янв. 2015 г. // Prospero. 2015. N 1 (13).

РЕАЛИЗАЦИЯ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ НА БАЗЕ ИЗОТРОПНЫХ АНТЕНН С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ

В.И. Милкин, В.С. Полежаев

PuPTKC, Морской институт, Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск (e-mails: MilkinVI@mstu.edu.ru; polezhaev.2014@yandex.ru)

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования всенаправленной в горизонтальной плоскости антенны коллинеарный «клевер» с увеличенным коэффициентом усиления по сравнению с классическим «клевером». Представлена компьютерная модель прикладного технического решения «этажерочный клевер» на базе данной антенны и создан исследовательский макет.

Abstract. The results of computer simulation of an omni-directional antenna in the horizontal plane collinear "clover" with a larger gain compared with the classic "clover". A computer model of applied technical solutions "flooring clover" on the base of the antenna and set up a research layout.

Введение

Изначально для приема сигналов и слежения за первыми спутниками Земли использовались станции, оснащенные очень большими направленными антеннами и довольно дорогим высокочувствительным оборудованием. Не очень совершенные первые искусственные космические объекты не имели стабилизации своего положения и для поддержания радиоконтакта с ними требовалась бы коррекция поляризации, в зависимости от наклона осей координат антенн на спутнике. То есть при линейной поляризации сложные конструкции антенн пришлось бы ещё и постоянно "крутить". В случае использования круговой поляризации в этом отпадала необходимость.

БПЛА как перспективное направление развития для антенн круговой поляризации

Уровень развития авиации и космической техники и технологий «приземлил» и расширил в последние годы использование летательных аппаратов и наблюдается взрывное развитие такого направления как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в основе использования которых лежит применение команднотелеметрических радиолиний связи для управления их полётами. Создание малых и сверхмалых многофункциональных БПЛА выдвигает требования к расширению функций наземного приёмопередающего комплекса и минимизации размеров бортового антенно-фидерного оборудования. Использование круговой поляризации радиоволн для радиосвязи с ними из-за обеспечения высокой маневренности БПЛА вновь стало востребованным.

Одной из основных проблем на пути развития систем связи, в том числе и командно-телеметрических радиолиний, является компенсация затухания сигнала на трассе распространения, разрешаемая конструкциями антенного оборудования путём увеличения коэффициентов усиления антенн и обеспечения отслеживания створа радиоканала [1]. Для оснащения антеннами наземных комплексов управления есть возможности широко применять направленные, с круговой поляризацией, что и используется. В свою очередь в качестве антенн БПЛА зачастую возникает необходимость использовать надёжные всенаправленные в азимутальной плоскости антенны, чтобы исключить потерю радиоконтактов и повысить безопасность полётов. Применение для этого штыревых вибраторов линейной поляризации на БПЛА снижает энергетику радиолинии на 3dB. С перспективой по характеристикам, из простых и надёжных всенаправленных антенн, реализующих круговую поляризацию, зачастую используются антенны типа «клевер». Круговая поляризация помогает подавить многолучевую интерференцию - проблему, которой страдают стандартные антенны-диполи. Доказано, что использование антенн такого типа существенно увеличивает дальность связи и улучшает качество сигналов. Их уже разработано несколько видов, но они также характеризуются пониженным коэффициентом усиления. Более эффективных разработок изотропных антенн пока не заявлено и поэтому есть необходимость рассмотреть техническое решение коллинеарного «клевера»!

Коллинеарный клевер

Известны классические коллинеарные антенны при использовании линейных элементов. Коллинеарные - означает «соосные». То есть все излучающие элементы фазированной антенной решётки расположены друг

под другом и тем самым обеспечивают усиление антенной системы при равномерном формировании поля в азимутальной плоскости. Фазировка происходит благодаря техническим решениям коммутации питания, обеспечивающего синфазность сигналов для всех активных элементов. Всё делается для того, чтобы все сигналы, принятые каждым элементом, приходили к общей точке в одной фазе и тем самым увеличивается усиление антенны (рис. 1).

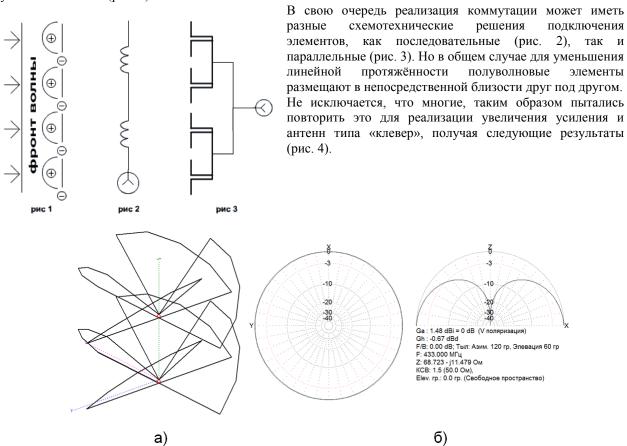


Рисунок 4. Коллинеарный «клевер»: а – геометрия; б – диаграмма направленности и параметры.

Но, исходя из классики пространственного разноса, целесообразным при размещении ненаправленных антенн в синфазной антенной решётке для формирования оптимальной направленности в сочетании требуемого эффекта при минимизации размеров является расстояние, соизмеримое с $\lambda/2$. Этот подход был исследован, но прогнозируемый результат был получен при питании от двух источников с фазовым разносом в 180 градусов, при подключении «клеверов» (рис. 5).

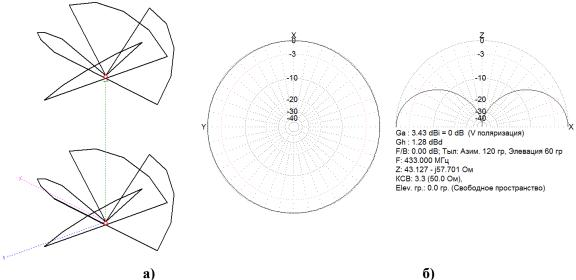


Рисунок 5. Коллинеарный «клевер» с разнесением элемента на расстояние $\lambda/2$: а – геометрия; б – диаграмма направленности и параметры.

Дополнительным эффектом при исследовании работы коллинеарного «клевера» выявилась возможность реализации подключения питания от одного источника за счёт эксклюзивного прикладного решения (рис. 6).

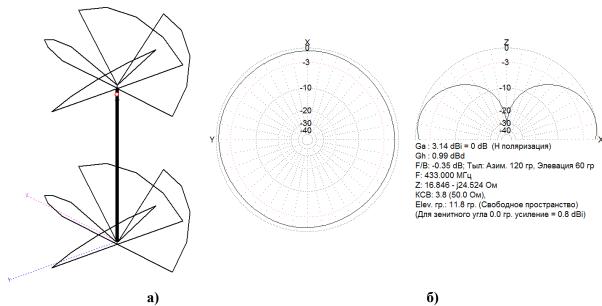


Рисунок 6. «Коллинеарный клевер» с прикладным решением подключения источника питания: а – геометрия; б – диаграмма направленности и параметры.

Прикладное решение на базе коллинеарного «клевера» - «этажерочный клевер»

Версия устройства прикладного технического решения может выглядеть следующим образом.

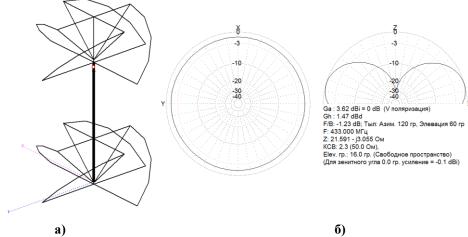


Рисунок 7. Компьютерная модель «этажерочного клевера»: **а** – геометрия; **б** – диаграмма направленности и параметры.

На рис. 8 изображён исследовательский макет с возможностью изменения и дополнения конструкционных элементов для натурных исследований.

Заключение

Результатом исследования является создание прикладного технического решение антенны изотропной антенны круговой поляризации «этажерочный клевер» на базе компьютерной модели, с коэффициентом усиления на 2 dB больше классического «клевера». По результатам работы создан исследовательский макет с возможностью дальнейших исследований.



Рисунок 8. Исследовательский макет «этажерочный клевер».

- 1. Боев Н.М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. Выпуск 2 (42) / гл. ред. д.т.н. Ковалев И.В. Красноярск: СибГАУ, 2012. С.86–91.
- 2. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе ММАNA. М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио». 2002 80 с.:ил. ISBN 5-93037-09203

КОМБИНИРОВАННЫЕ ДЕКАМЕТРОВЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ БЛИЖНЕЙ РАДИОСВЯЗИ

В.И. Милкин 1 , П.А. Быченков 2

¹PuPTKC MГТУ, Мурманск, e-mail: milkinvi@mstu.edu.ru ²MU МГТУ, Мурманскб e-mail: 33806@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены области применения радиоволн декаметрового диапазона, представлен анализ широко используемых антенн декаметрового диапазона. Представлено инновационное решение для антенн декаметрового диапазона, а также результаты моделирования его работы в программе MMANA-GAL. По результатам моделирования были определены основные параметры антенного устройства.

Abstract. Sphere of using decameter wave and widely used decameter band antennas have been analyzed. An innovative solution decameter band antenna and simulation results in program MMANA-GAL have been presented. During the simulation the main parameters of the antenna device were determined.

Введение

Декаметровые волны используются в основном для дальней связи, на тысячи километров, с подъёмом повыше антенн и использованием всех других средств, чтобы прижать главный лепесток излучения к горизонту, и получить касательное отражение волн от ионосферы. В то же время существует необходимость установления местной радиосвязи внутри региона, с ближайшими населенными пунктами, экспедициями, поисковыми и разведывательными партиями и т.д. Местная связь особенно необходима в рассредоточенных с малым заселением районах, а также во время стихийных бедствий и других чрезвычайных ситуациях. Современная телефонная сотовая связь покрывает лишь небольшую часть территории страны, а ее базовые станции, без которых она не может функционировать, например, выходят из строя при чрезвычайных ситуациях чуть ли ни первыми. Дальность действия УКВ-радио-станций ограничена дальностью прямой видимости, то есть первыми десятками километров, и сильно зависит от препятствий пересечённой местности или экранирующего действия хребтов в горных районах. Спутниковая связь дорога и мало доступна. Таким образом, диапазон дальностей порядка 40...400, 1000 км оказывается практически недоступен для современных УКВ и некоторых КВ средств связи. Для таких связей прижатый к горизонту максимум излучения антенн не оптимален и даже вреден. А если к этому добавить неподходящий выбор диапазона, то ближние корреспонденты вообще могут оказаться в мертвой зоне.

Техника связи NVIS

В последние годы возрос интерес к технике связи, названной NVIS - Near Vertical Incidence Skywave propagation. Эта техника предусматривает работу пространственной волной, падающей на ионосферный слой почти вертикально, и отражающейся тоже почти вертикально вниз, создавая значительную напряженность поля на небольших расстояниях (десятки - сотни километров) от передатчика. Антенны для NVIS, должны излучать преимущественно вверх. Они не всегда подходят для дальних связей, зато создают повышенную напряженность поля в ближней зоне, на расстояниях от 30 (где прямая декаметровая поверхностная волна уже затухает, где всё же возможно использовать УКВ) и до 500 км [1].

С учётом выше отмеченного есть необходимость более внимательно рассматривать подходы к организации ближней радиосвязи и комплексам технических средств, особенно к конструкциям антенн, в том числе с разработкой комбинированных технических решений.

Антенны декаметрового диапазона

Существует несколько типов «классических», относительно малозатратных для внедрения и эксплуатации антенн КВ диапазона, потенциально востребованных для ближней радиосвязи. Вибраторные горизонтальные дипольные антенны типа ВГД (диполь Надененко), ВГДШ – с шунтом, ромбические антенны, антенны бегущей волны, логопериодические антенны... Антенны ВГД (рис. 1) относятся к классу слабонаправленных антенн и могут применяться на расстояниях до 600 км. Антенны такого типа могут быть использованы только при ограниченных мощностях передатчиков, поскольку они создают помехи другим радиостанциям [2].

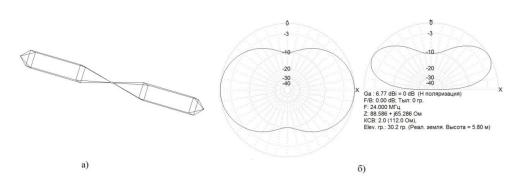


Рисунок 1. Антенна ВГД: а – геометрия, б – диаграмма направленности

Для того, чтобы улучшить диапазонные свойства антенн ВГД, применяют шунтирование и прочие модернизации. Одной из версий улучшенной антенны ВГД являются КВ антенны вибраторного типа для ближних и средних трасс, разработанные Российским институтом мощного радиостроения РИМР (рис. 2). В них за счет конструктивных инноваций улучшены диапазонные свойства шунтовых антенн, с упрощением конструкций путём устройства активного полотна антенн с размещением проводников в плоскости при разработке унифицированной серии для перекрытия всего КВ диапазона.

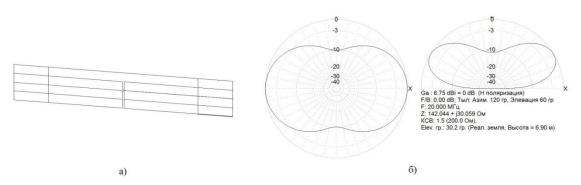


Рисунок 2. КВ антенна РИМР: **а** – геометрия, **б** – диаграмма направленности

Без повышения стоимостных показателей, значительного усложнения конструкций и увеличения материалоёмкости антенн не исключаются возможности улучшения их характеристик за счёт нестандартных технических решений.

Инновационная комбинированная декаметровая антенна для ближней радиосвязи

Из теории антенн известно, что улучшение электрических параметров проводниковых антенн возможно путём увеличения количества вибраторов, что приводит к усложнению и удорожанию в разы внедрения таких устройств и затруднений эксплуатации в декаметровом диапазоне радиоволн. Например, чтобы в двухмачтовой антенно-фидерной системе ВГД / ВГДШ повысить коэффициент усиления, с улучшением направленности, необходимо, либо значительно увеличить высоту мачт для размещения дополнительных этажей вибраторов, либо увеличить их количество, для организации директорных структур, с усложнением в обоих случаях цепей питания. Каждый дополнительный директор на 1-2 dB увеличивает коэффициент усиления антенны.

Небезынтересным предложением является устройство леерного типа на оттяжках директора, на базе используемых двух мачт, применяемых для развёртывания основного полотна антенной систем типа ВГДШ. Но такой директор можно разместить только намного ниже основного полотна антенны и стандартный подход здесь не подходит. Предлагается такой директор запитать по напряжению от точки питания основного полотна, с использованием линий питания в качестве активных элементов антенны, с перекрёстным подключением, так как его размещение производится на расстоянии, соизмеримом с четвертью средней рабочей длины волны. В таком случае возможно упрощение конструкции основного полотна до формы вибратора Пистолькорса, с выполнением директора в виде треугольной рамки с острым углом, нисходящим к подстилающей поверхности. Эскиз комбинированной декаметровой антенны представлен на рис. 3а.

Для сравнения работы представленных антенн было проведено электронное моделирование их работы в программе MMANA [3]. Исследование проводилось в диапазоне 3-30 М Γ ц, который был разбит на поддипазоны по 4 М Γ ц, каждому поддиапазону соответствуют свои размеры антенны и высота их поднятия

над землей. Эти данные были составлены на основе основных закономерностей, применяемых при расчете антенных устройств.

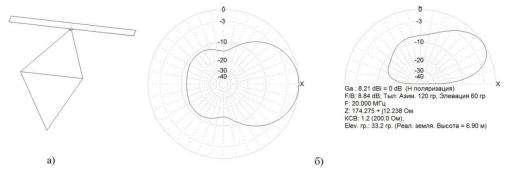


Рисунок 3. Комбинированная декаметровая антенна: a – геометрия, b – диаграмма направленности.

Изменение коэффициента стоячей волны в зависимости от диапазона для 4-х антенн представлено на рис. 4.

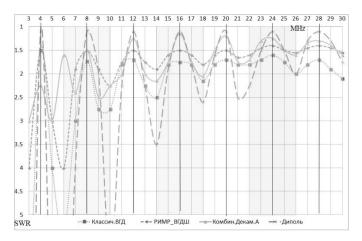


Рисунок 4. Коэффициент стоячей волны для четырех антенн в диапазоне.

По результатам исследования можно сделать вывод, что классический диполь обладает ярко выраженными резонансными свойствами, поэтому на границе поддиапазонов согласование с антенной сильно ухудшается. КВ антенна РИМР обладает лучшими по сравнению с ВГД диапазонными свойствами, что достигается благодаря шунтовому включению. Заявленная комбинированная антенна, исходя из данных исследования, имеет достаточно высокостабильное согласование с антенной. Сравнительные исследования изменения коэффициента усиления, отображённые на рис. 5, показывают, что заявленная комбинированная антенна обладает усилением на 1 дБ выше, чем у аналогичные антенн.

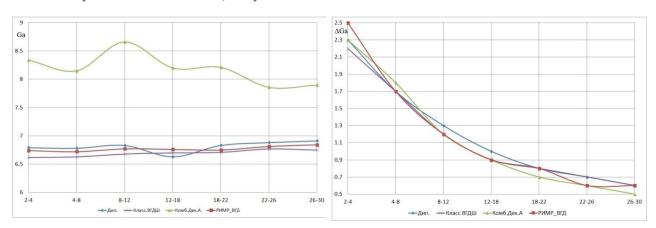


Рисунок 5. Коэффициент усиления для четырех антенн в диапазоне.

Рисунок 6. Изменение коэффициента усиления внутри поддиапазонов для четырех антенн.

Кроме этого, проведено исследование изменение коэффициента усиления внутри поддиапазонов. Данные представлены на рис. 6.

Анализ данных показывает, что заявляемая комбинированная декаметровая антенна сохраняет свои направленные свойства при перестройке внутри поддиапазонов не хуже аналогичных антенн.

Заключение

По результатам моделирования были исследованы основные характеристики завяленного антенного устройства, благодаря которым наглядно проявляются преимущества комбинированной антенны, которыми являются простота изготовления, уменьшенная металлоемкость, малое число требуемых высотных сооружений при более высоких электрических параметрах. Таким образом создано инновационное техническое решение декаметровой антенны преимущественно для ближней связи.

- 1. NVIS техника ближней связи на КВ / В. Поляков // Спецтехника и связь. 2009. Вып. № 1. С. 53.
- 2. Чернышов В.П., Антенно-фидерные устройства радиосвязи и радиовещания. М.: Связь, 1978. 288 с.
- 3. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе ММАNA. М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио». 2002 80 с.:ил. ISBN 5-93037-09203

ОПТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИКФИА СО РАН

С.В. Николашкин

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск e-mail: nikolashkin@ikfia.ysn.ru

Направления исследований

-комплексное исследование температурной стратификации и волновых процессов в высокоширотной средней и верхней атмосфере по сети станций оптического мониторинга;

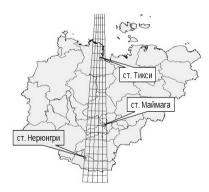
-динамические явления в диффузном сиянии и субавроральных красных дугах с целью диагностики магнитосферно-ионосферных процессов в окрестности плазмопаузы и околоземной области плазменного слоя во время суббурь и бурь;

-спутниковый мониторинг пространственно-временного распределения пирогенных событий, облачного покрова, аэрозольных полей и озонового слоя в Восточной Сибири, а также вариаций характеристик подстилающей поверхности (динамика обводненности местности, состояния вегетационного слоя и пр.) в зависимости от изменения климата и солнечной активности.

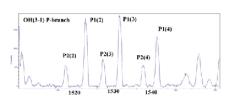
- 1. Измерения температуры мезопаузы. Вариации вращательной температуры излучения молекул гидроксила в области мезопаузы характеризуют волновые процессы различного масштаба (ВГВ, АГВ, приливные волны). Метод оценки вращательной температуры молекулярных эмиссий основан на подгонке модельных спектров, построенных с учетом аппаратной функции прибора для различных заранее заданных температурь, к реально измеренному спектру. При оценке вращательной температуры по полосе гидроксила были использованы вероятности перехода, рассчитанные в работе Mies F. H., 1974.
- а. Инфракрасный цифровой спектрограф (ИЦС) состоит из дифракционного спектрографа СП-50 с цифровойохлаждаемой до -50°СПЗС-камерой ST-6 и регистрирует полосу гидроксила ОН(6-2), излучающего в ближней инфракрасной области ~840 нм. Угол зрения спектрографа составляет 9°, ширина входной щели 0,6 мм и соответствует аппаратной функции 0,8 нм. Длительность экспозиции 10 минут.
- **б.** Спектрограф ShamrockSR-303i состоит из монохроматора, оснащенного высокочувствительным инфракрасным InGaAs фотодиодным детектором ANDORDU 490A-1.7. Рабочий диапазон длин волн 1490–1544нм. Спектры молекулы гидроксила ОН(3-1), излучающиеся на высоте около 87 км, регистрируются в автоматическом режиме при угле погружения Солнца > 7°, каждые 15 секунд и передаются ежесуточно через интернет на сервер Института. Временное разрешение спектрографа вместе с его высоким уровнем отношения сигнал-шум делает его эффективным инструментом для исследования внутренних гравитационных и инфразвуковых волн.
- В рамках международной программы исследования изменений мезопаузы (NDMC –Network for the Detection of Mesopause Change)

создается меридиональная цепочка станций, которая будет состоять из среднеширотной станции в Нерюнгри (56. 39°N, 124.43°E), высокоширотных станций Маймага (63.04°N, 129.51°E) и Тикси (71.58°N, 128.77°E). Каждая станция будет оснащена инфракрасными спектрографами Shamrock SR-303i, и камерами всего неба, регистрирующими динамику внутренних гравитационных волн по эмиссиям свечения ночного неба. В данное время спектрографы установлены в Тикси и в Маймаге. В Маймаге работают две камеры всего неба. В следующем году спектрограф будет установлен в Нерюнгри.

2. Интерферометр Фабри-Перо. Предназначен для измерения температуры и нейтрального ветра по тепловым уширениям и доплеровским сдвигам контуров кислородных эмиссий 557,7 и 630,0 нм, излучаемых на высотах нижней (97 км) и верхней (250 км) термосферы, соответственно. Состоит из



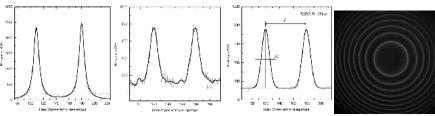




интерферометрической головки, телескопа с фокусным расстоянием 1200 мм и диаметром линзы 200 мм, регистрирующего устройства на базе ПЗС детектора ANDORiKon-M 934.

Основные характеристики эталона Фабри-Перо:

- Диаметр интерференционных пластин 150 мм
- Расстояние между пластинами, t 15 мм
- Инструментальная ширина для 557,7 нм 0,0015 нм
- Свободный спектральный интервал, для 557,7 нм 0,01037 нм



Пример сглаживания наблюдаемых контуров при помощи Фурье-фильтра с пятью первыми членами (а– лазер 632,8 нм, б– излучение ночного неба 557,7 нм).



- 3. Спектрофотометрические наблюдения эмиссий ночного неба, среднеширотных красных дуг (SAR-дуг) и сияний с целью исследования закономерностей проявления магнитосферной активности в окрестности плазмопаузы.
- а. Цифровой сканирующий вдоль меридиана фотометр с двумя каналами параллельной регистрации интенсивности эмиссий 557,7 и 630,0 нм [OI]с контролем чувствительности стабильным источником света и автоматическим программным управлением.

Основные характеристики:

- -Полуширина пропускания интерф. светофильтров, 2 нм
- Угловое разрешение 1.5 градуса
- Диапазон регистрации интенсивности, 10-50000 Релей.



б. Цифровой четырехканальный фотометр для измерений интенсивности эмиссий 427,8 и 630,0 нм в магнитном зените с контролем чувствительности стабильным источником света и автоматическим программным управлением.

Основные характеристики:

- Полуширина пропускания интерференционных светофильтров, 2 нм
- Диапазон регистрации интенсивности эмиссий, 2-10000 Релей.
- Временное разрешение регистрации, 1 с
- **в. Цифровые фотометры для исследования пульсаций** интенсивности молекулярных полос N2+ 391.4 и 427.8 нм в широтном интервале 4 градуса, обусловленных пульсирующими высыпаниями энергичных частиц кольцевого тока.

Основные характеристики:

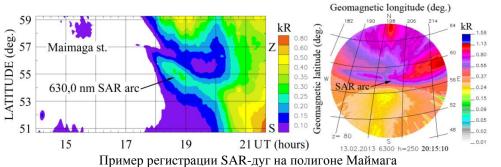
- Частота регистрации (дискретизации), 20 или 100 Гц.
- Амплитудное разрешение вариаций интенсивности, 0,5% от фонового уровня ночного неба.
- г. ССD камера всего неба фирмы «KeoScientificLtd.» для наблюдений субаврорального свечения и сияний в эмиссиях 630.0 и 557.7 нм [OI], 486.1 нм (H-Beta), 470.9 нм (N2+) с программным управлением началом и окончанием регистрации в течение ночи по заданным углам высоты Солнца и Луны, с учетом фазы Луны.

Основные характеристики:

- Полуширина пропускания интерференционных светофильтров, 2 нм



- Угловое разрешение, 0.2 градуса
- Диапазон регистрации интенсивности эмиссий При времени экспозиции 1 с, 100-100000 Релей. При времени экспозиции 10 с, 10-10000 Релей.

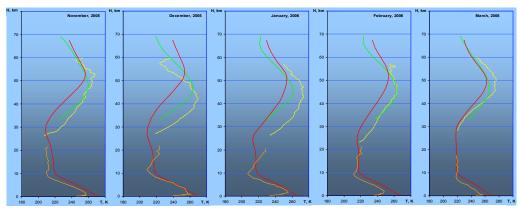




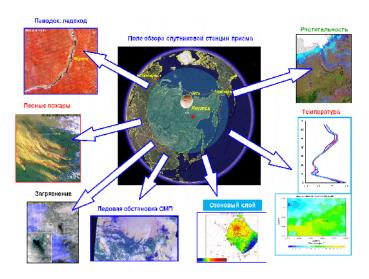
4. Стратосферный Релеевский лидар предназначен для измерения вертикального температурного профиля и аэрозольного рассеяния в диапазоне высот до 60 км. Время накопления сигнала за один сеанс составляет 20 мин. Вертикальное пространственное разрешение 75 метров.Лидар установлен на полигоне ШАЛ ИКФИА в 50 км южнее г. Якутска.



Основные характеристики лидара: Тип лазера: Nd:YAG, Длина волны излучения, 532 нм Частота импульсов, 20 Гц Выходная энергия, 195 мДж Диаметр луча/после расширителя, 6/60 мм Расходимость пучка, ~40 мкрад Телескоп системы Ньютона Диаметр зеркала, 0.6 м Фокусное расстояние, 2 м Поле зрения, 0.2 мрад Система счета фотонов: Hamamatsu H8259-01



Температурный профиль атмосферы в зимний период по данным лидара и аэрологического радиозонда в Якутске, лидара во Франции и по модели атмосферы CIRA

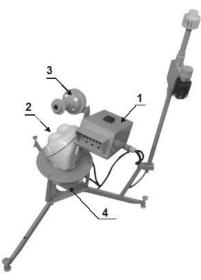


5. Станция приема спутниковых сигналов. Станция СКАНЭКС предназначена для приема информации, передаваемой с метеорологических ИСЗ серии NOAA в формате HRPT. Спектр решаемых задач: оперативный мониторинг подстилающей поверхности Земли на предмет паводкового разлива рек, облачного покрова, лесопожарной обстановки, техногенных загрязнений и др. Система дает возможность регулярного бесплатного получения спутниковой цифровой информации (согласно концепции "Открытого неба" ВМО) в режиме реального времени при помощи 5-канального радиометра AVHRR/NOAA с пространственным разрешением 1,1 км в полосе захвата приблизительно порядка 2500 км.

Технические характеристики:

- тип антенны параболическое зеркало; диаметр зеркала антенны 1,2 м;
- диапазон рабочих частот 1670... 1710 МГц;
- шумовая температура МШПР 60 К;
- 6. Солнечные фотометры предназначены для измерений спектральной прозрачности атмосферы с целью последующего определения аэрозольных оптических толщ (АОТ) и влагосодержания атмосферы. Измерения на различных участках спектра дают информацию о распределении частиц по размерам, концентрации влаги, показателе преломления, альбедо однократного рассеяния и аэрозольной оптической толщине (АОТ) в атмосфере. Атмосферная толщина (АОТ) оптическая аэрозольная определяется коэффициент поглощения и рассеяния солнечного света по всей толще атмосферы на той или иной длине волны оптического спектра, которая отражает размер рассеивающих частиц и характеризует интегральную концентрацию аэрозоля. Процесс измерений полностью автоматизирован и выполняется без участия оператора. Результаты измерений спектральной солнечной радиации (вместе с координатами и временем замеров) накапливаются в цифровом виде во flash-памяти прибора и затем передаются на персональный компьютер для обработки и анализа.а. AERONET (AErosolROboticNETwork) - это международная сеть под эгидой НАСА для проведения наблюдений за основными свойствами аэрозоля при помощи одинаковых, стандартизованных приборов типа CIMELCE-318 (http://aeronet.nasa.gov). Основополагающим принципом данной сети является единообразие методов и средств измерений, калибровка приборов, первичная обработка данных на одном месте и их доступность в сети Интернет. Интенсивность солнечной радиации измеряется в 8 участках спектра (от УФ до ИК) на диске Солнца и на различных углах по вертикали и горизонтали от его положения.б. Фотометр SP-9 отечественный аналог. Измерения производятся на 9 областях спектра, обработка данных производится на месте, прибор калибруется методом сравнения с солнечным фотометром «Аэронет» при совместной работе на одном месте. При нормальных условиях эксплуатации и калибровки данных, погрешность определения АОТ составляет 0.01-0.02 ед., влагосодержания атмосферы ~0.1 г/см².



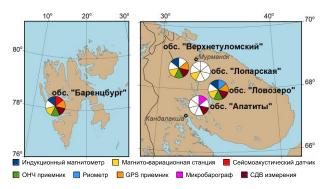


НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АРКТИКЕ

С.В. Пильгаев, М.В. Филатов, А.В. Ларченко, А.В. Ролдугин, А.С. Никитенко, С.А. Черноус О.М. Лебедь, Ю.В. Федоренко

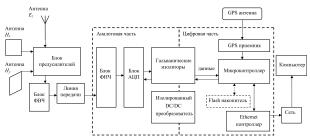
Полярный геофизический институт, Anamumы (e-mail: pilgaev@pgia.ru)

Обсерватории Полярного геофизического института



Унифицированная система сбора данных

- Эксплуатируется в обсерваториях ПГИ с 2008 г.
- Обеспечивает определение времени каждого отсчета данных с максимальной ошибкой менее 1 мкс.
- Применяется для регистрации данных индукционных магнитометров, ОНЧ приемников, микробарографов и сейсмоакустического датчика.



Функциональная схема унифицированной системы сбора данных

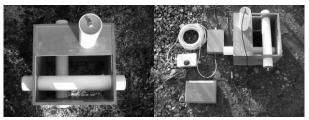


Слева - конструкция унифицированной системы сбора данных. Справа - компьютеры системы сбора данных в обс. "Баренцбург".

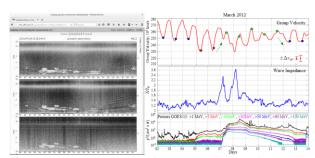
М.В. Филатов, С.В. Пильгаев, Ю.В. Федоренко. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента, 2011, No 3, c. 73–75

Трехкомпонентный индукционный магнитометр

- Предназначен для измерения амплитуд и фаз компонент магнитного поля на сети станций для исследования искусственных и естественных КНЧ и СНЧ сигналов в диапазоне частот от тысячных долей до нескольких сотен Гц.
- Применяется для изучения микропульсаций магнитного поля и в экспериментах при электромагнитном зондировании земной коры.
- Использует унифицированную систему сбора данных.



Трехкомпонентный индукционный магнитометр



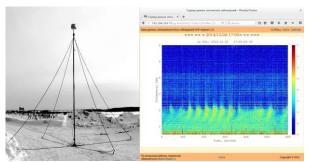
Слева - иллюстрация работы сервера для быстрого просмотра данных индукционного магнитометра. Справа - скорость распространения и отношение $E_{\mathbb{Z}}/H_{\tau}$ электромагнитных импульсов (атмосфериков) в СНЧ диапазоне.

Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Ларченко А.В., Пильгаев С.В. Реакция авроральной нижней ионосферы на солнечные вспышки в марте 2012 г. по данным наблюдений в СНЧ диапазоне // Геомагнетизм и Аэрономия. -2015. - Т. 55. № 6. С. 797-807.

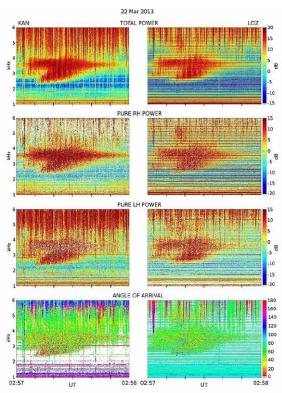
Прецизионная синхронизация данных с мировым временем в обс. "Ловозеро" и "Баренцбург" позволила обнаружить, время что во сильных гелиогеофизических возмущений наблюдаются изменения характера зависимости скорости и выраженные всплески волнового импеданса. Эти явления могут использоваться в качестве индикаторов возникновения неоднородностей проводимости D-слоя ионосферы при мониторинге изменений ее состояния в окрестности высокоширотной трассы Ловозеро-Баренцбург.

Трехкомпонентный СНЧ/ОНЧ приемник

- Предназначен для регистрации двух горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компонент поля ОНЧ излучений у земной поверхности в диапазоне частот от 30 Гц до 15 кГп
- Использует унифицированную систему сбора данных.



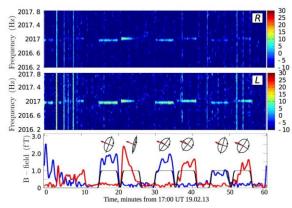
Слева - антенны трехкомпонентного ОНЧ приемника. Справа - иллюстрация работы сервера для быстрого просмотра ОНЧ данных



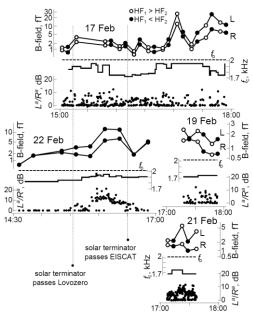
ОНЧ событие со сложной спектральной структурой, наблюдаемое в Kannuslehto (KAN), Финляндия, и в Ловозеро (LOZ), Россия.

J. Manninen, N.G. Kleimenova, Yu.V. Fedorenko, P.A. Bespalov and T. Turunen. New results of structured VLF emissions observed simultaneously at two closely located stations near L-5.5 // Annales Geophysicae, 32, 1163-1167, 2014

наблюдениям противоположность Каннуслехто измерение вертикальной компоненты электрического поля в Ловозеро дало возможность определить направление на область выхода в диапазоне углов 0...360, а не 0...180. ОНЧ эмиссии наблюдаются одновременно на обеих станциях и право-, левостороннюю имеют так И поляризации, что свидетельствует о большой протяженности ионосферной области выхода.



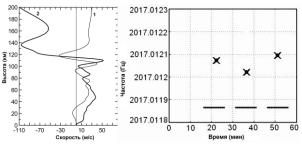
Спектрограммы R- и L- мод в обс. Ловозеро 19 февраля 2013 г. и огибающие горизонтального магнитного поля на частотах 2016.966 Гц (голубая линия) и 2017.012 Гц (красная). Эллипсы представляют поляризацию, стрелки указывают на EISCAT/HEATING.



Среднеквадратичные значения R- и L- мод, усредненные за время каждого цикла нагрева.

Yu. Fedorenko, E. Tereshchenko, S. Pilgaev, V. Grigoryev, and N. Blagoveshchenskaya. Polarization of ELF waves generated during "beat-wave" heating experiment near cut-off frequency of the Earth-ionosphere waveguide // Radio Science, Vol. 49, Issue 12, pp. 1254-1264, 2014.

Впервые обнаружено, что на частоте, близкой к частоте поперечного резонанса волновода Земляионосфера, правая поляризация магнитного поля под искусственным источником изменяется на левую на расстоянии нескольких длин волн от него.



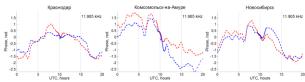
Слева - зональный ветер. Справа - доплеровское смещение частоты модуляции.

E.D. Tereshchenko, O.I. Shumilov, E.A. Kasatkina, A.D. Gomonov // Geophysical Research Letters. - 2014. - V.41(13). - P. 4442-4448, doi:10.1002/2014GL060376.

Обеспечиваемая ОНЧ приемником прецизионная временная синхронизация данных впервые дала возможность обнаружить доплеровские изменения частоты, генерируемой на комбинационных частотах. Показано, что причиной наблюдаемых изменений частоты является зональный ветер в D-области ионосферы.

СДВ измерения

• Прецизионная синхронизация отсчетов данных с мировым временем, обеспеченная унифицированной системой сбора, дала возможность производить классические измерения фаз СДВ передатчиков.



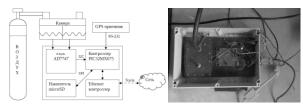
Фазы сигналов, зарегистрированных в обс. Ловозеро (синим цветом) и Баренцбург (красным цветом).
Слева направо: передатчики в Краснодаре,
Комсомольске-на-Амуре и в Новосибирске.

Во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 в обсерваториях ПГИ Ловозеро и Баренцбург проводились измерения фаз сигналов передатчиков российской радионавигационной системы РСДН-20. Наблюдалось значимое понижение фаз этих сигналов на 0.3-0.4 рад.

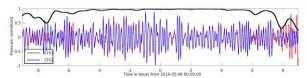
Жидкостный микробарограф

- Предназначен для записи вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов от нескольких секунд до нескольких часов с разрешением 0.02 Па.
- Использует унифицированную систему сбора данных с емкостно-цифровым преобразователем AD7747

- **О.И. Ахметов, С.В. Пильгаев, Ю.В. Федоренко, Д.В. Днепровский**. Жидкостный Микробарограф. Приборы и техника эксперимента, 2010, № 5, с. 137-141.
- С.В. Пильгаев, М.В. Филатов, А.В. Ларченко, Ю.В. Федоренко. Автономный синхронизированный с мировым временем жидкостный микробарограф. Приборы и техника эксперимента, 2016, No 5, c. 155–157.



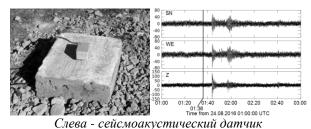
Слева - функциональная схема жидкостного микробарографа. Справа - конструкция жидкостного микробарографа.



Вариации давления, зарегистрированных микробарографами в двух разнесенных на 213 м точках в интервале периодов 5-20 мин. Черная кривая - текущий коэффициент корреляции между приведенными вариациями давления.

Регистратор сейсмоакустических волн

- Предназначен для регистрации сейсмических колебаний в диапазоне от долей до десятков Гц.
- Использует унифицированную систему сбора данных.
- Состоит из трех расположенных ортогонально геофонов, предусилителя и аналого-цифрового преобразователя.
- Установлен на научной станции ПГИ "Баренцбург".
- Вместе с аппаратурой для наблюдений низкочастотного электромагнитного поля регистратор дает возможность исследовать связь сейсмоакустических и электромагнитных явлений.



Слева - сеисмоакустический оатчик (арх. Шпицберген). Справа - землетрясение в Италии магнитудой 6.2 24 августа 2016 г. Время в очаге 01:36 UTC.

Fedorenko Y.V., Husebye E.S., Matveeva T. Cossack Ranger II – A High Quality, Versatile and Affordable 3-Component Short-Period Station. In E.S. Husebye (ed.) Earthquake Monitoring and Seismic Hazard in Balkan Countries. Springer Publishing, Berlin, 2008. P. 189–196.

ЯКУТСКИЙ СПЕКТРОГРАФ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ИМ. А.И. КУЗЬМИНА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

С.А Стародубцев, В.Г. Григорьев, П.Ю. Гололобов

ФГБУН Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31; e-mail: starodub@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Современный Якутский спектрограф космических лучей им. А.И. Кузьмина способен регистрировать частицы в широкой области энергий от 2 до 300 ГэВ. В состав спектрографа входят: 1. нейтронный монитор 24-NM-64; 2. четыре однотипных мюонных телескопа МТ на газоразрядных счетчиках СГМ-14, которые регистрируют частицы, приходящие из 5 различных направлений и установлены на уровнях 0, 7, 20 и 40 метров водного эквивалента; 3. четыре новых однотипных мюонных телескопа SMT на сцинтилляционных счетчиках СЦ-301, способных регистрировать частицы, приходящие из 13 различных направлений, и установленных на тех же 4-х уровнях. Для всего комплекса приборов проведены расчеты приемных характеристик (приемных векторов), учитывающих их геометрию, траектории частиц в магнитном поле Земли, влияние атмосферы и вид спектра первых двух угловых моментов функции распределения космических лучей. Параметры приемных характеристик спектрографа и данные текущей регистрации интенсивности космических лучей доступны для всех заинтересованных пользователей посредством интерактивных запросов на сайте Института по адресам http://www.ysn.ru/ipm и http://www.ysn.ru/smt. Спектрограф космических лучей работает в непрерывном режиме 1-мин и 1-час регистрации, что обеспечивает получение детальной информации о состоянии межпланетной среды, понижениях Форбуша, вспышках солнечных космических лучей и анизотропии космических лучей, а также позволяет решать прикладные научные задачи, связанные с проявлениями космической погоды на Земле. Последнее обстоятельство является весьма важным для регионов Российской Арктики, где, в силу структуры геомагнитного поля, отрицательные проявления космической погоды носят наиболее выраженный характер.

Abstract. The modern Yakutsk cosmic ray spectrograph after A.I. Kuzmin is able to register particles in wide range of energies from 2 to 300 GeV. The spectrograph consists of: 1. a neutron monitor 24-NM-64; 2. four same type muon telescopes MT on the basis of gas discharge counters GMC-14, which register particles arriving from 5 different directions and are setted up at the levels 0, 7, 20 and 40 meters of water equivalent; 3. four same type muon telescopes SMT on the basis of counters SC-301, which are able to register particles arriving from 13 different direction, and setted up at the same 4 levels. For all complex of devices, the calculations of their receiving characteristics were held (receiving vectors), which take into account their geometry, trajectories of particles in the Earth's magnetic field, the influence of the atmosphere and the form of spectrum of first two angular moments of a cosmic ray distribution function. The parameters of receiving characteristics of the spectrograph and the data of current registration of cosmic ray intensity are available for all interested users through interactive requests in the Institute's website by the addresses http://www.ysn.ru/ipm and http://www.ysn.ru/smt. The spectrograph of cosmic rays operates in continuous regime of 1-min and 1-hour registration, which provides the detailed information about the interplanetary medium state, Forbush decreases, solar flares and anisotropy of cosmic rays, and allows to solve the applied scientific problem, which are connected with the manifestation of space weather on the Earth. The last circumstance is very important for regions of the Russian Arctic, where, due to the structure of geomagnetic field, negative manifestations of space weather have most pronounced character.

Комплекс детекторов для регистрации интенсивности КЛ на Якутском спектрографе

Комплекс детекторов космического излучения, установленный на современной станции космических лучей (КЛ) Якутск, позволяет регистрировать нейтроны и мюоны, рожденные при взаимодействии потока КЛ галактического и солнечного происхождения с атмосферой Земли. По своим характеристикам и возможностям этот комплекс приборов представляет собой спектрограф КЛ, носящий имя его основателя проф. А.И. Кузьмина, под руководством которого в 1950-х годах был разработан и создан первый наземноподземный комплекс мюонных телескопов. Спектрограф способен регистрировать интенсивность КЛ в широкой области энергий от 2 до 300 ГэВ. В настоящее время в состав спектрографа входят: 1). нейтронный монитор 24-NM-64; 2). четыре однотипных мюонных телескопа МТ на газоразрядных счетчиках СГМ-14, которые регистрируют частицы, приходящие из 5 различных направлений и установлены на уровне земли о водного эквивалента (м в.э.), и в специальной вырытой шахте на уровнях 7, 20 и 40 м в.э.; 3). четыре новых однотипных сцинтилляционных мюонных телескопа SMT на счетчиках СЦ-301, способных регистрировать частицы, приходящие из 13 различных направлений, и установленных на тех же 4-х уровнях. Регистрация мюонов телескопами МТ на газоразрядных счетчиках основана на тройных совпадениях, а

сцинтилляционных SMT— на двойных. Общий вид детекторов КЛ на газоразрядных счетчиках приведен на Рис. 1, нового сцинтилляционного мюонного телескопа SMT-0, установленного на уровне земли— на Рис. 2, а комплекса зданий спектрографа КЛ - на Рис. 3. Спецификация станции КЛ Якутск приведена в Таблице 1. Направления регистрации частиц различными мюонными телескопами показаны в Таблице 2, где N, S, E и W— стандартные обозначения сторон света.

Для корректного использования полученных данных регистрации интенсивности КЛ необходимо знать и уметь правильно применять специальные методы, позволяющие учитывать положение станции (географические координаты и высоту над уровнем моря), которое определяет вклад в данные регистрации магнитного поля и атмосферы Земли. Для этого в работе [1] введено понятие коэффициентов связи приборов. Для примера, ниже приведены коэффициенты связи нейтронного монитора для минимума и максимума солнечной активности (Рис. 4), а также кратность генерации мюонов в атмосфере Земли, рассчитанная согласно модели [2] для различных направлений прихода частиц, и соответствующие ей коэффициенты связи мюонных телескопов на газоразрядных счетчиках МТ (Рис. 5).





Рисунок 1. Нейтронный монитор 24-NM-64 и мюонный телескоп МТ-7 на газоразрядных счетчиках СГМ-14 установленный в шахте на уровне 7 м в.э.



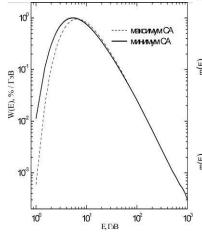
Рисунок 2. Сцинтилляционный мюонный телескоп SMT-0, установленный на уровне 0 м в.э. Площадь эффективной регистрации счетчика СЦ-301 составляет 1 м^2 . Еще три таких телескопа установлены в шахте на уровнях 7, 20 и 40 м в.э

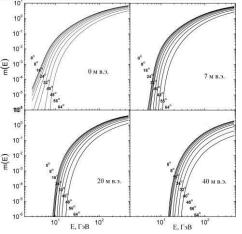


Рисунок 3. Общий вид комплекса зданий спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина.

Таблица 1. Спецификация станции КЛ Якутск.

Two tings It of the private of the p									
Станция	Широта,	Долгота,	Высота над	Геомагнитный	Стандартное				
	градус	градус	уровнем моря, м	порог обрезания,	давление, мб				
				ГВ					
Якутск	61.59 N	121.49 E	95	1.65	1003				





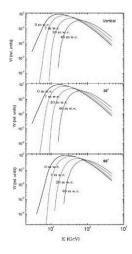


Рисунок 4. Коэффициенты связи нейтронного монитора для максимума и минимума солнечной активности.

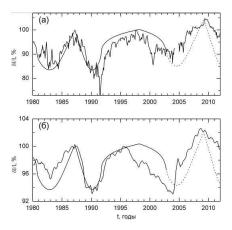
Рисунок 5. Кратность генерации мюонов в атмосфере Земли и коэффициенты связи для мюонных телескопов МТ на газоразрядных счетчиках СГМ-14.

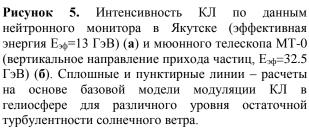
Таблица 2. Направления регистрации частиц мюонными телескопами в Якутске.

Детектор	Направление регистрации, градус
Мюонный телескоп МТ	Вертикаль, 30N, 60N, 30S, 60S
Сцинтилляционный мюонный телескоп	Вертикаль, 50N, 50S, 50E, 50W, 67N, 67S, 74N, 74S, 59NE,
SMT	59NW, 59SE, 59SW

Численные значения параметров приемных характеристик (множественность генерации мюонов, диаграммы направленности, коэффициенты связи, траектории частиц в магнитосфере частиц и приемные вектора для 1-й и 2-й сферических гармоник функции распределения КЛ), рассчитанные для Якутского спектрографа, а также данные текущей регистрации интенсивности КЛ доступны посредством интерактивных запросов на сайте ИКФИА СО РАН по адресам http://www.ysn.ru/ipm u http://www.ysn.ru/ipm u http://www.ysn.ru/smt.

Некоторые результаты, полученные на основе измерений Якутского спектрографа КЛ





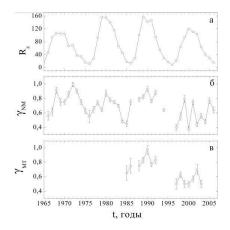
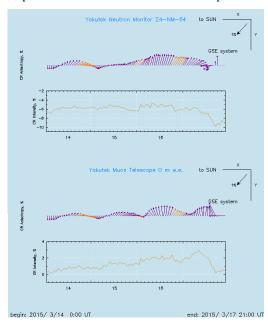


Рисунок 6. Зависимость среднегодовых чисел солнечных пятен Rz (**a**), показателя жесткостного спектра форбуш-понижений по данным нейтронных мониторов γ_{NM} (**6**) и мюонных телескопов γ_{MT} (**b**) от времени в 20-23 циклах солнечной активности. Указаны статистические ошибки измерений показателя жесткостного спектра эффектов Форбуша

В 2007 г. ИКФИА СО РАН была создана базовая модель модуляции КЛ в гелиосфере [3]. В отличие от множества других моделей, ней присутствует только один подгоночный параметр — уровень остаточной турбулентности солнечного ветра. На основе этой модели удалось удовлетворительно объяснить наблюдаемую долговременную модуляцию интенсивности КЛ, в том числе и в прошедшем аномальном 23-цикле солнечной активности (Рис. 5).

На основе измерений Якутского спектрографа КЛ также установлено, что энергетический спектр форбушпонижений в 23-м цикле солнечной активности является существенно более жестким, чем в 3-х предыдущих циклах. Вследствие этого, установлено, что в данном солнечном цикле в формировании понижений КЛ преобладает роль пробочного механизма [4].

Кроме того, на основе измерений Якутского спектрографа КЛ проводятся прикладные работы по прогнозу космической погоды [5, 6]. Результаты текущего прогноза геомагнитных бурь доступны для всех заинтересованных пользователей по адресу: http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/currents_real_time.html. Отметим, что прогноз космической погоды является весьма важным для регионов Российской Арктики, где, в силу структуры геомагнитного поля, ее отрицательные проявления на многие технические системы и здоровье человека носят наиболее выраженный характер.



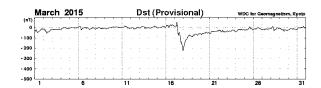


Рисунок 7. Пример прогноза геомагнитной бури 17 марта 2015 г. по измерениям анизотропии КЛ на спектрографе КЛ им. А.И. Кузьмина в режиме реального времени (слева). Регистрация одновременного изменения направления анизотропии КЛ в направлении от Солнца (красные стрелки) по измерениям детекторов КЛ с различными характеристиками является предвестником (за ~1 сутки) прихода на орбиту Земли крупномасштабного возмущения солнечного ветра, которое вызвало геомагнитную бурю.

Справа показана зависимость Dst-индекса от времени, подтверждающая наблюдение предсказанной геомагнитной бури 17 марта 2015 г. (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.htm)

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №23 и грантов РФФИ №15-42-05085-р_восток_а и №15-42-05083-р_восток_а.

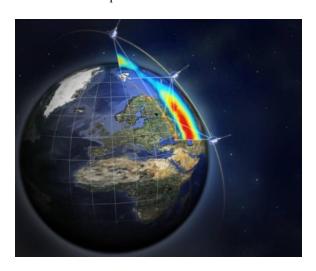
- 1. Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Гостехиздат, 1957. 492с.
- 2. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Григорьев В.Г. Модель генерации мюонов в земной атмосфере. Геомаг. аэрон., Т. 51, С.716-720, 2011.
- 3. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.П., Герасимова С.К. Гелиосферная модуляция интенсивности космических лучей высоких энергий. І. Базовая модель модуляции космических лучей с циклом солнечной активности. ЖЭТФ, Т.31, Вып.2, С.214-221, 2007.
- 4. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Исаков Д.Д. Энергетический спектр Форбуш-понижений на фазе роста 24-го цикла солнечной активности. Геомаг. аэрон., Т.54, С.304–309, 2014.
- 5. Krymsky G.F., P.A. Krivoshapkin, V.G. Grigoryev, G.V. Skripin and V.P. Chuprova. Dynamics of the Cosmic Ray Current Behaviour During Large-Scale Solar Wind Disturbances. Proc. 28-th ICRC, Tsukuba, Japan, SH 2.2, P.3613- 3616, 2003.
- Grigoryev V.G., S.A. Starodubtsev, P.A. Krivoshapkin, A.N. Prikhodko and A.G. Yegorov. Cosmic ray anisotropy based on Yakutsk station in real time. Adv. Space Res., V. 41, P.943-946, 2008.

РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ПОЛЯРНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА КНЦ РАН (РТУ ПГИ КНЦ РАН)

Е.Д. Терещенко, Р.Ю. Юрик, В.Ф. Григорьев, Н.Ю. Романова

Полярный геофизический институт, Мурманск e-mail: romanova@pgi.ru

Радиотомографическая установка ПГИ (http://pgia.ru/about/labs/lrsi/1/) является единственной установкой такого типа в России (УНУ создана в 1989 году и включена в реестр уникальных научных установок (УНУ) Подобные установки имеются В США УНУ. Великобритании. Однако, параметры используемой в ПГИ, превосходят подобные протяженности области установки ПО исследований (полярная шапка - средние широты), так и по области применения.



Описание РТУ, назначение, главные преимущества

Установка состоит из семи территориальноразнесенных приемных станций, которые на когерентных частотах осуществляют регистрацию радиосигналов от низкоорбитальных навигационных спутников. Приемные станции РТУ оснащены системами дистанционного управления и системами сбора и передачи данных и работает автономно в непрерывном режиме.

Преимущества установки:

- получение экспериментальных данных о состоянии ионосферы в широком пространственном диапазоне от архипелага Шпицберген до средних широт;
- высокое временное разрешение;
- получение локальных (неинтегральных) распределений электронной плотности и характеристик ионосферных неоднородностей;
- устойчивость к возмущениям в высоких широтах.

Основные направления научных исследований, проводимых с использованием УНУ

- Мониторинг и диагностика ионосферы арктических и средних широт методом лучевой радиотомографии в условиях воздействия естественных и искусственных агентов.
- Изучение и анализ ионосферных неоднородностей разных масштабов по данным о мерцаниях радиосигнала НО СНС.

Аппаратура РТУ

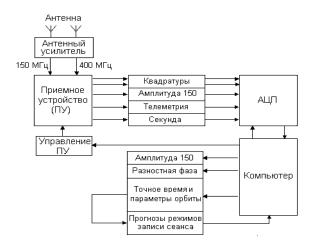
Радиотомографический метод исследования структуры ионосферы, основанный на приеме в территориально разнесенных точках сигналов искусственных спутников Земли низкоорбитальных спутниковых (HO) навигационных систем типа «Парус» («Цикада», «Надежда»), начал развиваться в начале 90-х годов прошлого века. Устойчивый к возмущениям среды и позволяющий получить за несколько минут двумерные распределения плотности электронов на расстояниях в несколько сотен километров вдоль поверхности Земли, метод не имеет в настоящее время полноценной замены.

В ПГИ был создан ряд идентичных приемных комплексов основанных на промышленных навигационных спутниковых приемниках АДК-ЗМ. Разработанная аппаратура мобильна и легко может быть установлена в любом заданном месте приема. Она полностью автоматизирована и не требует присутствия оператора, что позволяет осуществлять работу в автономном режиме.

Приемная аппаратура включает в себя дополнительно блок выделения телеметрической информации необходимой для расчета эфемерид ИСЗ и регистрации точного времени. Аппаратура приемного комплекса создана на современной элементной базе и управляется персональным компьютером. Структурная схема представлена на рисунке.

Технические характеристики приемной системы на основе АДК (чувствительность, коэффициенты усиления трактов приемника и т.д.) удовлетворяют параметрам спутникового приемника, если учесть, что мощность спутникового передатчика на частоте 400 МГц составляет 0,8 Вт, а на 150 МГц - 1,5 Вт. Реализованный приемник уверенно принимает сигналы спутника практически уже в момент его появления в зоне радиовидимости. Сигналы от спутников на частотах вблизи 150 и

400 МГц принимаются на две совмещенные антенны круговой поляризации простой конструкции, выполненные в виде симметричных полуволновых крест-вибраторов.



Структурная схема аналогового приемного

вертикальной плоскости антенны имеют широкую диаграмму направленности (~150° на уровне -3 дБ), что позволяет осуществлять прием сигналов ИСЗ в большом секторе углов места. Приемная аппаратура РБ-020 изделия АДК имеет режимов (литеров) для переключения необходимых устройств с целью приема одного спутника, излучающего когерентные частоты вблизи 150 и 400 МГц, образуемые частотным синтезатором и синхронизируемые с помощью Цезиевого стандарта частоты, установленным на спутнике. Каждая пара когерентных частот находится в точном соотношении 3/8.

Структура данных РТУ

ходе радиотомографических излучаемые навигационным спутником сигналы на когерентных частотах 150 МГц и 400 МГц (соотношение между частотами 5/8), в виде двух квадратур (I и Q составляющие комплексного сигнала), регистрируются как разности фаз зондирующего (150 МГц) и приведенного к меньше частоте опорного сигнала (400 МГц), по которым вычисляются разностная фаза амплитуда, используемые В дальнейших исследованиях. Кроме результатов наблюдения сигналов на когерентных частотах регистрации содержат служебную информацию об эфемеридах спутников И синхронизированы установленному на спутнике цезиевому стандарту времени.

Регистрации амплитуд и разности фаз, проведенные в отдельном приемном пункте РТУ (одноточечные измерения), в дальнейшем могут быть использованы при детерминированном подходе для определения местоположения отдельных рассеивателей спутникового сигнала в

ионосфере ионосферных И размеров неоднородностей В направлении движения статистической спутника. При наличии однородности протяженных областей ионосферных неоднородностей по данным о функции когерентности второго порядка возможно локализовать области неоднородности ионосфере, а также определить двумерный срез корреляционной функции (спектра) флуктуаций электронной плотности (метод статистической радиотомографии случайно-неоднородной ионосферы).

Использование многоточечных измерений РТУ ПГИ КНЦ позволяет определить на основе томографического подхода по совокупности измеренных интегральных характеристик двумерную структуру глобальных неоднородностей электронной плотности, а также двумерный срез дисперсии флуктуации электронной плотности (метол лучевой радиотомографии Куницын и др. 2007; Куницын и др. 2009]). Результаты регулярного мониторинга ионосферы с использованием РТУ ПГИ КНЦ РАН позволяют исследовать динамику и связи ионосферных процессов в системе наблюдения геофизических явлений.

Результаты регулярных наблюдений в виде отдельных файлов регистрации и файлов, содержащих информационные данные по отдельным пролетам, дистанционно передаются в ПГИ и после предварительной обработки и систематизации включаются в банк данных спутниковых пролетов РТУ ПГИ КНЦ РАН.



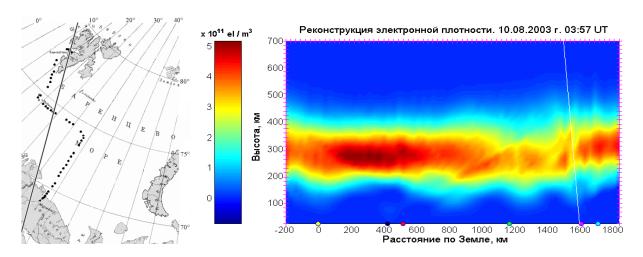
Приемные комплексы РТУ и ВО СНС (обс. ПГИ "Баренцбург")

В каталоге-таблице регистраций с наблюдением сигналов всех приемных пунктах радиотомографической установки, Шпицберген до г. Москвы указаны дата и время спутниковых пролетов, номера спутников и тип пролета, характеристики пролета (угол места и азимут), а также имена файлов-регистрации для всех шести приемных пунктов радиотомографической установки. В визуальном каталоге расположены графики амплитуды и фазы начиная от самой северной станции (обс. ПГИ «Баренцбург») до самой южной (Москва), дата, время начала спутникового сеанса и номер спутника.

По результатам наблюдений на всех станциях реконструируется распределение электронной плотности в ионосфере. Реконструкция ионосферы – это восстановление распределения электронной концентрации в томографическом сечении, которое представляет собой двумерную функцию, отображенную в условных цветах.

Наиболее значимые научные результаты исследований

С помощью меридиональной цепочки приемных станций, в том числе на борту научноисследовательского судна в акватории Баренцева моря, общей протяженностью 1700 км, выполнена непрерывная и детальная радиотомография распределения электронной плотности ионосферы от субавроральной области до полярной шапки. Выявлена сложная структура ионосферы даже при спокойных геофизических условиях. На представленном ниже рисунке т. 0 соответствует г. Кемь, а т. 1600 - п. Баренцбург.



Траектория НИС и реконструкция электронной плотности для спутникового сеанса 10.08.2003 г. в 03:57 UT.

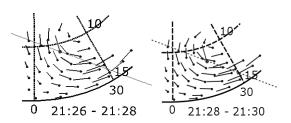
С использованием инфраструктуры обсерватории Баренцбург (п. Баренцбург, арх. Шпицберген) проведены комплексные исследования верхней атмосферы земли арктическом регионе, В выявившие заметные изменения в ионосфере во время воздействия на нее мощного электромагнитного излучения нагревного стенда SPEAR.



Эксперимент на нагревном стенде SPEAR 9 марта 2007 г. – скорость пространственного изменения ПЭС по данным РТУ.

В ходе нагревных кампаний на установке "Сура" (Нижегородская область) был экспериментально подтвержден теоретически предсказанный "Зенитэффект".

На основе сопоставления радиотомографических данных о сцинтилляциях спутниковых радиосигналов и данных о высокоширотной конвекции плазмы, полученных радарной системой SuperDARN, определено, что поперечная ориентация мелкомасштабных неоднородностей в F области высокоширотной ионосферы совпадает с направлением дрейфа ионосферной плазмы.

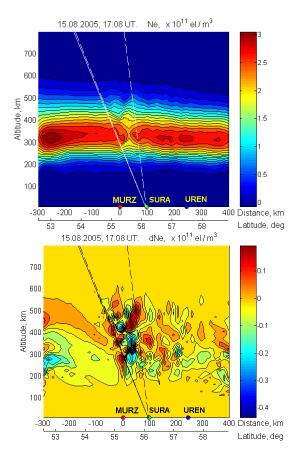


Ионосферная конвекция 5 декабря 2004 г. по данным SuperDARN (синий цвет) и ориентация поперечной анизотропии (красный цвет).

радиотомографии Методом спутниковой направлении геомагнитного поля обнаружены искусственные квазипериодические крупномасштабные возмущения плотности плазмы, генерируемые мощным радиоизлучением высонагревного коширотного стенда, которые занимают интервал высот от уровня отражения волны накачки до 500-600 км.

Благодарности. Авторы благодарны Худукону Б.З., внесшему значительный вклад в создание Радиотомографической установки. Работы на уникальной научной установке также поддержаны грантами РФФИ № 16-05-01024 и № 15-05-02437.

- 1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 336 С. 2007.
- 2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б, том 1-3, часть 2, С. 91-125.- М.: Янус-К. 2009



Экспериментальная (вверху) и разностная (внизу) реконструкции 15.08.2005 г. в 17:08 UT.

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АРКТИКЕ

Сборник трудов конференции

Технический редактор В.Ю. Жиганов

Подписано к печати 10.11.2016 Формат бумаги 60х84 1/8. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 15,35. Заказ № 48. Тираж 80 экз.

Российская Академия Наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Кольский научный центр Российской академии наук 184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14