



# ТРУДЫ

**6/2015** (32)

**ГЕЛИОГЕОФИЗИКА**

выпуск 1

Апатиты  
2015

---

Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра

6/2015 (32)

издается с декабря 2010 г.

УДК 550.38

ISBN 978-5-91137-337-5

Главный редактор –  
д. г. - м. н., проф. Ю. Л. Войтеховский

Заместители главного редактора:  
д. г. - м. н., проф. В. П. Петров,  
д. т. н., проф. Б. В. Ефимов

Редационный совет:  
академик Г. Г. Матишов,  
академик Н. Н. Мельников,  
чл. - корр. В. К. Жиров,  
чл. - корр. А. Н. Николаев,  
д. э. н. Ф. Д. Ларичкин,  
д. т. н. В. А. Маслобоев,  
д. г. - м. н. В. П. Петров (зам. главного  
редактора), д. т. н. В. А. Путилов,  
д. ф. - м. н. Е. Д. Терещенко,  
к. г. - м. н. А. Н. Виноградов  
(отв. секретарь)

Редколлегия серии «Гелиогеофизика»:  
д. ф.-м. н. В. Е. Иванов (отв. ред.),  
д. ф. - м. н. А. А. Намгаладзе,  
д. ф. - м. н. О. И. Шумилов,  
к. ф. - м. н. Я. А. Сахаров,  
к. ф. - м. н. Ю. В. Федоренко,  
к. ф. - м. н. И. В. Мингалев,  
к. ф. - м. н. О. В. Мингалев,  
к. ф. - м. н. В. Б. Белыховский

ГЕЛИОГЕОФИЗИКА

выпуск 1

184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул.  
Ферсмана, 14, Кольский научный центр РАН  
Тел.: (81555) 79393, 79380, факс: (81555) 76425  
E-mail: admin@admksk.apatity.ru,  
<http://www.kolasc.net.ru>

© Полярный геофизический институт, 2015  
© Кольский научный центр Российской академии наук, 2015

**СОДЕРЖАНИЕ**

	Стр.
<b>ФИЗИКА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ</b>	
Германенко А. В. Сезонные вариации в различных компонентах вторичных космических лучей в приземном слое полярной атмосферы.....	9
Когай Т. Г., Головчанская И. В, Корнилов И. А., Корнилова Т. А., Мельник М. Н. Ультранизкочастотные возмущения в плазменном слое хвоста магнитосферы, сопряженные с предбрейкаповыми E-W-дугами: признаки магнитных резонансов.....	14
Попова Т.А. Сопряженные измерения потоков протонов на низких высотах и ЭМИЦ-волн в магнитосфере.....	21
Белаховский В. Б., Воробьев В. Г., Билин В. А. Отклик ночных полярных сияний на отрицательный SI импульс.....	26
Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М. Анализ результатов регистраций грозовой активности на Кольском полуострове в 2013-2014 гг.....	34
Петрашова Д. А., Белишева Н. К. Цитогенетические эффекты высокоэнергетической нейтронной компоненты космических лучей в клетках меристемы <i>Allium cepa</i> .....	41
Завадская Т. С., Михайлов Р. Е., Чеботарева Е. Н., Белишева Н. К. Вариабельность микрофлоры человека в зависимости от гелиогеофизических агентов в условиях Заполярья.....	50
Муравьев С. В., Цетлин В. В., Белишева Н. К. Сенсорные свойства воды как индикатор вариаций космо-геофизических агентов.....	54
Канатьев А. Г., Шумилов О. И., Касаткина Е. А., Мошникова М. А. Дендрохронологические исследования на Кольском полуострове.....	59

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРИРОДНЫХ СРЕД

Сидоренко А. Е., Терещенко Е. Д., Терещенко П. Е., Григорьев В. Ф.	Влияние солнечного затмения 20 марта 2015 г. на распространение СНЧ-радиоволн на высокоширотных трассах .....	68
Ларченко А. В., Лебедь О. М., Никитенко А. С., Пильгаев С. В.	Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в сигналах ОНЧ- передатчиков РСДН-20 по данным обсерваторий Ловозеро и Баренцбург...	73
Кириллов В. И., Галахов А. А., Пчелкин В. В.	Исследование влияния солнечного затмения на частотные спектры атмосфериков.....	78
Золотов О. В.	О некоторых проблемах обнаружения предвестников сильных землетрясений в полном электронном содержании ионосферы Земли.....	82
Карпов М. И.	Формирование мезомасштабного электрического поля в ионосфере в периоды подготовки землетрясений...	87
Филатов М. В., Швец М. В., Пильгаев С. В., Ларченко А. В., Черноус С. А.	Полярные сияния как индикатор устойчивости сигнала GPS-приемника...	93
Лебедь О. М., Ларченко А. В., Пильгаев С. В., Федоренко Ю. В.	Решение уравнения типа свертки с помощью инверсного фильтра.....	101
Пильгаев С. В., Ларченко А. В., Федоренко Ю. В.	Модовый состав поля искусственного ионосферного источника.....	107
Пильгаев С. В., Ларченко А. В., Филатов М. В., Никитенко А. С., Лебедь О. М., Федоренко Ю. В.	Трехкомпонентный СНЧ/ОНЧ-приемник с прецизионной привязкой к мировому времени.....	113

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В ГЕОФИЗИКЕ

Ахметов О. И., Мингалев И. В., Мингалев О. В., Федоренко Ю. В.	Численная схема решения уравнений Максвелла на примере гармонического электрического диполя .....	120
Мельник М. Н., Ахметов О. И., Мингалев О. В., Мингалев И. В.	Точное решение уравнений Максвелла для точечного дипольного источника в однородном изотропном проводнике и на плоской границе двух однородных изотропных сред.....	126
Орлов К. Г., Мингалев И. В., Мингалев В. С., Чечеткин В. М., Мингалев О. В.	Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Земли для условий зимы и лета.....	140
Федотова Е. А., Мингалев И. В.	Расчеты потоков собственного излучения с высоким спектральным разрешением в безоблачной атмосфере на средних широтах .....	146
Маурчев Е.А.	Численное моделирование в различных задачах физики космических лучей.....	152
Мингалёв И. В., Сецко П. В.	Расчет траекторий заряженных частиц в магнитосфере Земли.....	157
Васильев П. А., Клопова А. И., Артеменко К. А., Калугин Д. В., Клименко М. В., Карпачев А. Т., Клименко В. В., Ратовский К. Г., Коренькова Н. А., Белинская А. Ю., Степанов А. Е.	Проверка адекватности описания эмпирическими моделями зимнего ночного главного ионосферного провала в минимуме солнечной активности .....	163

*Russian Academy of Sciences*

6/2015 (32)

**transactions**

**Kola Science Centre**

UDC 550.38

ISBN 978-5-91137-337-5

Editor-in-Chief –  
Yu. L. Voitehovskiy, Dr. Sc. (Geology and Mineralogy)

Deputy Editors-in-Chief:  
V. P. Petrov, Dr. Sc.  
(Geology and Mineralogy),  
B. V. Efimov, Dr. Sc.  
(Engineering)

Editorial Council:

G. G. Matishov, Acad. of RAS,  
N. N. Melnikov, Acad. of RAS,  
V. K. Zhironov, Cor. Member of RAS,  
A. N. Nikolaev, Cor. Member of RAS,  
F. D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),  
V. A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),  
V. P. Petrov, Dr. Sc.  
(Geology and Mineralogy),  
V. A. Putilov, Dr. Sc. (Engineering),  
E. D. Tereshchenko, Dr. Sc. (Physics and  
Mathematics),  
A. N. Vinogradov, Dr. Sc. (Geology and  
Mineralogy) – Executive Secretary

**HELIOGEOPHYSICS**

Series 1

Editorial Board of Heliogeophysics Series:

V. E. Ivanov, Dr. Sc. (Phys. and Math.),  
Executive Editor,  
A. A. Namgaladze, Dr. Sc.  
(Phys. and Math.),  
O. I. Shumilov, Dr. Sc. (Phys. and Math.),  
Y. A. Sakharov, PhD (Phys. and Math.),  
Yu. V. Fedorenko, PhD (Phys. and Math.),  
I. V. Mingalev, PhD (Phys. and Math.),  
O. V. Mingalev, PhD (Phys. and Math.),  
V. B. Belakhovskiy, PhD (Phys. and Math.)

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia  
Tel. (81555) 79380, fax: (81555) 76425  
E-mail: [admin@admksk.apatity.ru](mailto:admin@admksk.apatity.ru),  
<http://www.kolasc.net.ru>

© Polar Geophysical Institute, 2015  
© Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, 2015

CONTENTS

	Page
PHYSICS OF THE SOLAR-TERRESTRIAL CONNECTIONS	
Germanenko A. V. Seasonal variations in the various components of secondary cosmic rays in the polar atmosphere ground level.....	9
Kogai T. G., Golovchanskaya I. V., Kornilov I. A., Kornilova T. A., Melnik M. N. ULF perturbations in the magnetospheric plasma sheet conjugate to the east-west auroral arcs before onset: signatures of field-line resonances.....	14
Popova T. A. Conjugated measurements of proton fluxes at low altitudes and EMIC waves in the magnetosphere.....	21
Belakhovsky V. B., Vorobjev V. G., Bilin V. A. The response of the nighttime aurora to the negative SI impulse.....	26
Burtsev A. V., Nevretdinov Y. M. Analysis of registration results of lightning discharges on the Kola Peninsula in 2013-2014 rr. ....	34
Petrashova D. A., Belisheva N. K. The cytogenetic effects of the cosmic rays high-energy neutron component in the <i>Allium cepa</i> meristematic cells.....	41
Zavadskaya T. S., Mihajlov R. E., Chebotareva E. N., Belisheva N. K. Variation of the microflora of the person depending on heliogeophysical agents under the conditions of the polar region.....	50
Muravev S. V., Tsetlin V. V., Belisheva N. K. Water sensory properties are the indicator of space and geophysical agents variations...	54
Kanatjev A. G., Shumilov O. I., Kasatkina E. A., Moshnikova M. A. Dendrochronological investigations at the Kola Peninsula.....	59

RADIOPHYSICS METHODS OF THE NATURAL ENVIRONMENTS  
INVESTIGATION

Sidorenko A. E., Tereshchenko E. D., Tereshchenko P. E., Grigoriev V. F.	The influence of the solar eclipse of 20 March 2015 on the propagation of ELF radio waves in high latitudes.....	68
Larchenko A. V., Lebed O. M., Nikitenko A. S., Pilgaev S. V.	Effects of solar eclipse of March 20 2015 in VLF signals RSDN-20 based on a data from Lovozero and Barentsburg observatories.....	73
Kirillov V. I., Galakhov A. A., Pchelkin V. V.	Observations of VLF atmospheric spectra during the solar eclipse of March 20, 2015.....	78
Zolotov O. V.	On some problems towards detection of strong earthquakes precursors in the Earth's ionosphere total electron content observations.....	82
Karpov M. I.	Formation of the mesoscale electric field in the ionosphere during preparation of earthquakes.....	87
Filatov M. V., Shvets M. V., Pilgaev S. V., Larchenko A. V., Chernous S. A.	Auroras as an indicator of the stability of the GPS signal receiver .....	93
Lebed O. M., Larchenko A. V., Pilgaev S. V., Fedorenko Yu. V.	Deconvolution by an inverse filter.....	101
Pilgaev S. V., Larchenko A. V., Fedorenko Yu. V.,	Mode content of the wavefield from artificial ionospheric source .....	107
Pilgaev S. V., Larchenko A. V., Filatov M. V., Nikitenko A. S., Lebed O. M., Fedorenko Yu. V.	The three components VLF receiver with the precise coupling to the universal time.....	113

NUMERICAL METHODS AND INFORMATION TECHNOLOGIES  
IN GEOPHYSICS

Akhmetov O. I., Mingalev I. V., Mingalev O. V., Fedorenko Yu. V.	Difference scheme for the numerical solution of Maxwell's equations on the example of harmonic electrical dipole.....	120
Melnik M. N., Akhmetov O. I., Mingalev O. V., Mingalev I. V.	Exact solutions of Maxwell equation for a point dipole source in a homogeneous isotropic conductor and on plane boundary of two homogeneous isotropic media.....	126
Orlov K. G., Mingalev I. V., Mingalev V. S., Chechetkin V. M., Mingalev O. V.	Numerical modeling of the global Earth's atmospheric circulation for the winter and summer conditions.....	140
Fedotova E. A., Mingalev I. V.	Calculation of radiation fluxes with high spectral resolution in the cloudless atmosphere at the middle latitudes .....	146
Maurchev E. A.	Numerical modeling in various tasks of cosmic ray physics.....	152
Mingalev I. V., Setsko P. V.	Calculation of trajectories of charged particles in the Earth's magnetosphere.....	157
Vasiljev P. A., Klopova A. I., Artemenko K. A., Kalugin D. V., Klimenko M. V., Karpachev A. T., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Korenkova N. A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E.	Checking of the adequate description by empirical models of the winter nighttime main ionospheric trough during solar activity minimum.....	163

# ФИЗИКА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

УДК 551.521.64

**А. В. Германенко**

## **СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТАХ ВТОРИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ПОЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЫ**

### **Аннотация**

Представлены результаты мониторинга различных компонент вторичных космических лучей в приземном слое полярной атмосферы. В ходе мониторинга в части компонент была обнаружена годовая вариация. Предложен механизм возникновения данной вариации.

### **Ключевые слова:**

*вторичные космические лучи, гамма-излучение, годовая вариация.*

**A. V. Germanenko**

## **SEASONAL VARIATIONS IN THE VARIOUS COMPONENTS OF SECONDARY COSMIC RAYS IN THE POLAR ATMOSPHERE GROUND LEVEL**

### **Annotation**

The results of the monitoring of the various components of the secondary cosmic rays in the surface layer of the polar atmosphere have been presented. The monitoring showed annual variation in the different components. A mechanism of this variation has been proposed.

### **Keywords:**

*secondary cosmic rays, gamma radiation, annual variation.*

### **Введение**

В лаборатории космических лучей в течение нескольких лет ведется непрерывный мониторинг различных компонентов вторичных космических лучей. Для этого была создана комплексная система мониторинга радиационного фона в различных видах излучений: нейтронной компоненты, низкоэнергичной заряженной и низкоэнергичной электромагнитной компонент [1-3]. На атмосферу Земли из космического пространства падает поток первичных космических лучей. Влетая в атмосферу Земли и сталкиваясь с ядрами атомов, частицы первичного потока вызывают каскад ядерных реакций. Именно эти вторичные частицы и достигают нижних слоев атмосферы и поверхности Земли. Среди них имеются электроны, мюоны, гамма-кванты и нейтроны. Эти частицы регистрируются экспериментальным комплексом мониторинга излучения, созданным в рамках нашей работы.

### **Комплексная установка мониторинга вторичных космических лучей**

К настоящему времени помимо стандартного нейтронного монитора (НМ) в состав комплекса в Апатитах входят детекторы гамма-квантов на сцинтилляционных кристаллах (СД), бессвинцовая секция нейтронного

монитора (БСНМ), детектор заряженной компоненты (ДЗК) и детектор тепловых нейтронов (ДТН). Сцинтилляционные детекторы регистрируют гамма-излучение в диапазоне энергий от 20 кэВ до 5 МэВ, НМ чувствителен к нейтронам с энергиями более 50 МэВ [4], БСНМ – к нейтронам с энергиями сотни кэВ – единицы МэВ, ДТН – тепловые нейтроны, ДЗК регистрирует все заряженные частицы (мюоны, электроны, позитроны) с энергиями более 2 МэВ. С помощью сцинтилляционного детектора и многоканального амплитудного анализатора непрерывно ведутся измерения дифференциального спектра гамма-излучения с временным разрешением в 30 мин. Данные со всех приборов поступают в общую систему регистрации [1]. Подобная система, пока в усечённом виде, установлена в Баренцбурге (арх. Шпицберген). На данный момент она состоит из трёх секций стандартного нейтронного монитора и сцинтилляционного гамма-детектора. Анализ данных, полученных на этих установках за последние несколько лет, позволил выявить наличие сезонных вариаций в некоторых компонентах космических лучей.

### Сезонные вариации излучения

Рентгеновский фон в приземном слое атмосферы имеет сезонные колебания, что приводит к годовой вариации в этой компоненте излучений. Она наблюдается как в Апатитах, так и на станции в Баренцбурге (арх. Шпицберген). Вариации счёта гамма-детекторов в обоих пунктах регистрации за 2009-2014 гг представлены на рис.1. Как видно из графика, поток гамма-излучения увеличивается весной – летом, достигая максимума в июле – августе, и падает зимой, достигая минимума в марте (Апатиты) и в апреле – мае (Баренцбург). В Апатитах амплитуда годовой вариации составляет ~25 %, в то время как в Баренцбурге она доходит до 50 %. На рис.2 показана среднегодовая вариация гамма-излучения, вычисленная методом наложения эпох. Вариация имеет выраженный несимметричный характер: достаточно широкий плоский максимум на протяжении теплого сезона и спад на протяжении осени – зимы с резким ростом в весенний период. При этом в Баренцбурге спад начинается раньше, а рост позже.

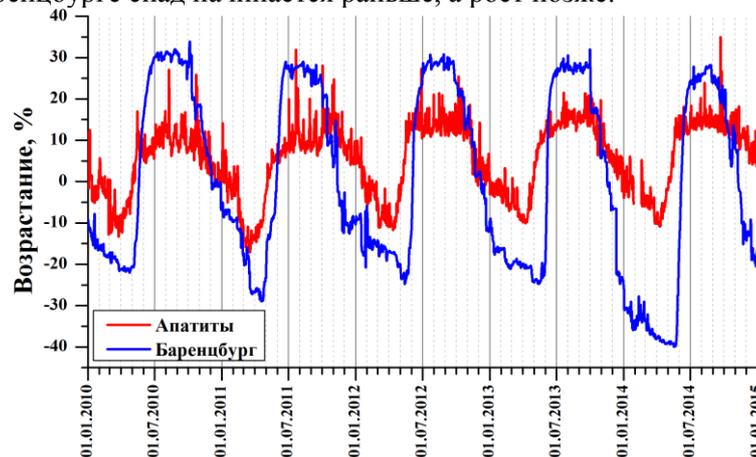


Рис.1. Сравнение годовых вариаций счёта детекторов гамма-излучения в Апатитах (красная линия) и на станции Баренцбург (арх. Шпицберген) (синяя линия)

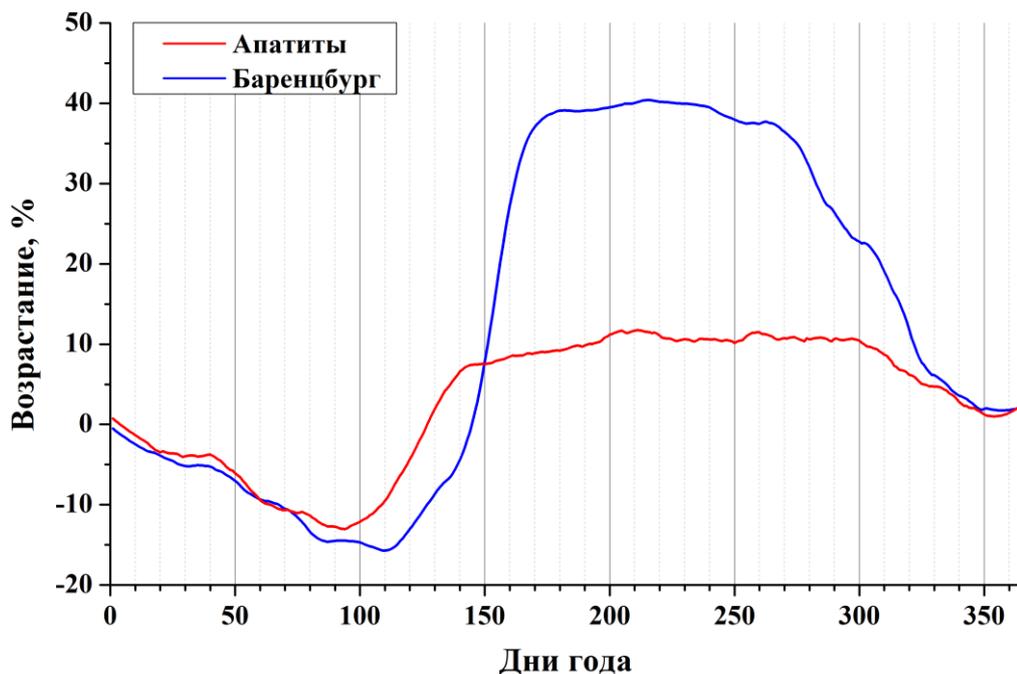


Рис.2. Среднегодовая вариация гамма-излучения в приземном слое атмосферы на станциях Апатиты и Баренцбург, вычисленная методом наложения эпох за 2009-2014 гг.

Отметим, что обе станции располагаются далеко от зон тектонических разломов, а Баренцбург находится еще и в зоне вечной мерзлоты. Эти факторы указывают, что выделение радона из почвы минимально или вообще отсутствует и, соответственно, не может служить причиной вариации. Против радоновой гипотезы также говорит факт отсутствия подобной вариации в заряженной компоненте. В работе [5] приводится подробное описание дополнительно выполненных экспериментов, подтверждающих отсутствие вклада в эти вариации каких-либо радионуклидов-загрязнителей природного или антропогенного характера.

Наличие комплекса регистрации различных вторичных компонентов космических лучей позволяет исследовать годовые вариации во всех компонентах и сравнить их. На рис.3 показаны готовые вариации, полученные методом наложения эпох, для ст. Апатиты для всех имеющихся детекторов. Годовая вариация на нейтронном мониторе (НМ) отсутствует, наблюдается лишь убывающий тренд. Он связан с 11-летним циклом солнечной активности, минимум которой пройден в 2009 г. Других существенных вариаций на НМ не наблюдается. Именно так и должно быть, НМ имеет конструкцию, сводящую влияние локальных условий к минимуму. Поведение бессвинцовой секции нейтронного монитора (БСНМ) в целом совпадает с НМ (имеется спад, присутствуют такие же флуктуации, связанные с космическими факторами), однако каждый год в холодный сезон возникает провал счета БСНМ.

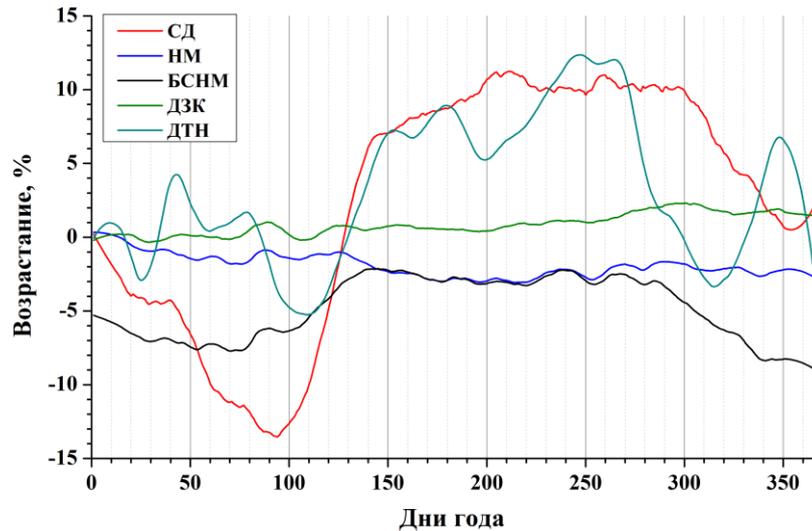


Рис.3. Среднегодовая вариация на всех имеющихся детекторах: сцинтилляционном гамма-детекторе (СД, красная линия), нейтронном мониторе (НМ, синяя линия), бесвинцовой секции нейтронного монитора (БСНМ, чёрная линия), детекторах заряженной компоненты (ДЗК, зелёная линия) и тепловых нейтронов (ДТН, тёмно-голубая линия)

С началом теплого сезона уровень возвращается к НМ. Это наглядное влияние на БСНМ местных условий и локальных параметров среды. В холодный период с появлением снежного покрова поток альбедных нейтронов из почвы уменьшается (снег – вещество с высоким содержанием протонов, что обеспечивает эффективное замедление нейтронов и меньший их выход в атмосферу) и БСНМ регистрирует только нейтроны, падающие из верхней полусферы, как и НМ. Отсутствие же влияния снега на НМ объясняется как раз наличием внешнего полиэтиленового слоя, обеспечивающим защиту НМ от альбедных нейтронов и других локальных причин.

Годовая вариация на детекторе тепловых нейтронов (ДТН) в целом повторяет БСНМ, имеет большую амплитуду, но подвержена другим дополнительным факторам, что несколько маскирует годовую вариацию. Годовая вариация на детекторе заряженной компоненты (ДЗК), как и на НМ, отсутствует.

Примечательно, что профили годовой вариации сцинтилляционного детектора (СД) и БСНМ не просто совпадают по фазе, но практически полностью повторяют друг друга. У БСНМ в теплый период года наблюдается несколько скошенное плато. Скос его определяется тем же трендом, что и у НМ, а спад осенью-зимой и резкий подъем весной совпадают с СД.

Столь точное и явное совпадение профилей годовых вариаций на двух различных детекторах указывает общую причину, влияющую на эти компоненты вторичных космических лучей. Такие большие годовые вариации трудно объяснить вариациями температуры атмосферы.

Предположительно, природа этой вариации та же, что и возрастных – электрическое поле. Помимо годовых вариаций на СД наблюдаются возрастные (до 50 % в отдельных событиях), связанные с осадками [2, 3]. Совокупность фактов, полученных во время наблюдений этих возрастных, указывает, что они могут быть связаны с эффектом доускорения заряженных частиц (электронов и мюонов) в электрических полях дождевых облаков [6]. В этом случае годовая вариация, по-видимому, будет обусловлена вариацией глобального электрического поля в атмосфере Земли, в то время как возрастные при осадках – с локальными вариациями электрического поля в облаках. Для полного выяснения этой связи требуются дальнейшие и более полные и комплексные исследования не только космических лучей, но и атмосферных процессов.

### **Заключение**

В ходе мониторинга различных компонент вторичных космических лучей у поверхности земли обнаружена годовая вариация. Она наблюдается в рентгеновском диапазоне 20 кэВ – 5 МэВ, а также в нейтронной компоненте до энергий в единицы МэВ. Одной из возможных причин может быть вариация электрического поля в атмосфере.

### **Литература**

1. Вариации естественного рентгеновского фона в полярной атмосфере / Ю. В. Балабин, А. В. Германенко, Б. Б. Гвоздевский, Э. В. Вашенюк // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 3. С. 376-386.
2. Features of the flux of gamma-radiation in the lower atmosphere during precipitation / A. V. Germanenko, Yu. V. Balabin, B. B. Gvozdevsky, E. V. Vashenyuk // J. of Phys. Conf. Ser. 2013. Vol. 409. 012241.
3. Variations of gamma radiation spectra during precipitations / Yu. V. Balabin, A. V. Germanenko, B. B. Gvozdevsky, E. V. Vashenyuk // J. of Phys. Conf. Ser. 2013. Vol. 409. 012243.
4. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 402 с.
5. High-energy photons connected to atmospheric precipitations // A. V. Germanenko, Yu. V. Balabin, B. B. Gvozdevsky, L. I. Schur, E. V. Vashenyuk // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. Vol. 7. P. 471-475.
6. Rust W. D., Trapp R. J. Initial balloon soundings of the electric field in winter nimbostratus clouds in the USA // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29. P. 1959-1962.

### **Сведения об авторе**

**Германенко Алексей Владимирович,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
germanenko@pgia.ru

УДК 550.383

**Т. Г. Когай, И. В. Головчанская,  
И. А. Корнилов, Т. А. Корнилова, М. Н. Мельник**

### **УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ, СОПРЯЖЕННЫЕ С ПРЕДБРЕЙКАПОВЫМИ E-W-ДУГАМИ: ПРИЗНАКИ МАГНИТНЫХ РЕЗОНАНСОВ**

#### **Аннотация**

По сопряженным вдоль магнитного поля спутниковым и авроральным данным проверяется сценарий перехода к взрывной фазе суббури, связанный с возбуждением магнитных резонансов в плазменном слое хвоста магнитосферы. Используются наблюдения полей и плазмы спутниками THEMIS и авроральные all-sky наблюдения в обс. Лопарская Полярного геофизического института для суббури 06.01.2008, UT = 20:30-21:20. Показано, что наблюдаемые в плазменном слое ULF волновые возмущения, сопряженные с E-W-дугами на предварительной фазе суббури, проявляют признаки тороидальных магнитных резонансов, возбуждаемых импульсом азимутального электрического поля или динамического давления в солнечном ветре.

#### **Ключевые слова:**

*ULF-возмущения, магнитные резонансы, суббуря, авроральные дуги.*

**T. G. Kogai, I. V. Golovchanskaya, I. A. Kornilov, T. A. Kornilova, M. N. Melnik**

### **ULF PERTURBATIONS IN THE MAGNETOSPHERIC PLASMA SHEET CONJUGATE TO THE EAST-WEST AURORAL ARCS BEFORE ONSET: SIGNATURES OF FIELD-LINE RESONANCES**

#### **Annotation**

In this study, a scenario of transition to substorm onset based on excitation of field line resonances (FLRs) in the magnetosphere has been verified by conjugate spacecraft and auroral observations. Specifically, we use THEMIS in situ measurements of electric and magnetic fields in the magnetospheric plasma sheet and all-sky auroral observations at Loparskaya observatory of Polar Geophysical Institute in a substorm event on 06.01.2008, UT = 20:30-21:20. It has been shown that the ULF waveforms detected in conjunction with the E-W auroral structures at substorm growth phase exhibit signatures of toroidal FLRs excited by an impulse in the solar wind azimuthal electric field or dynamic pressure.

#### **Key words:**

*ULF waves, field line resonances, substorm, auroral arcs.*

#### **Введение**

Среди множества сценариев перехода к взрывной фазе суббури, предложенных к настоящему времени, известен сценарий, основанный на резонансном взаимодействии быстрой (сжимаемой) и поперечной (альфвеновской) мод в плазменном слое хвоста магнитосферы [1], возбуждении магнитных резонансов (field line resonances, FLRs) и их взаимодействии с током хвоста в конце предварительной фазы суббури, приводящем к его ответвлению в ионосферу [2].

Данный сценарий представляет особый интерес в так называемых East-West (E-W) событиях перехода к взрывной фазе суббури, когда все авроральные проявления на предварительной и в начале взрывной фазы, включая уярчения на полярной границе овала сияний, отщепляющиеся от неё и распространяющиеся к экватору авроральные структуры, предбурейкаповую дугу и структуры,

отделяющиеся от предбрейкаповой дуги после её уярчения, имеют исключительно East-West топологию. Как известно, структуры именно такой топологии хорошо объясняются в рамках физического механизма FLR [3, 4].

**Спутниковые и авроральные наблюдения для суббури 06 января 2008 и их сравнение с теоретическими предсказаниями в модели, основанной на возбуждении магнитных резонансов в плазменном слое хвоста магнитосферы**

В настоящей работе для суббури 06 января 2008 г., 20:30-21:20 UT используются сопряженные *in situ* наблюдения полей и плазмы в плазменном слое хвоста магнитосферы спутниками ТНС (P2) (-9.8, 1.2, -3.3)  $R_E$  и ТНА (P5) (6.6, 0.8, -2.0)  $R_E$  (указанные GSM координаты спутников мало менялись в течение события) и авроральные наблюдения на обс. Лопарская Полярног о геофизического института. Исходная и фильтрованная кеограммы, а также характерные all-sky изображения с нанесёнными, согласно T96, проекциями спутников показаны на рис.1, из которого следует, что начиная примерно с 20:30 UT спутники находились внутри E-W-структур, отделившихся от уярчений вблизи полярной кромки аврорального овала и распространяющихся к экватору.

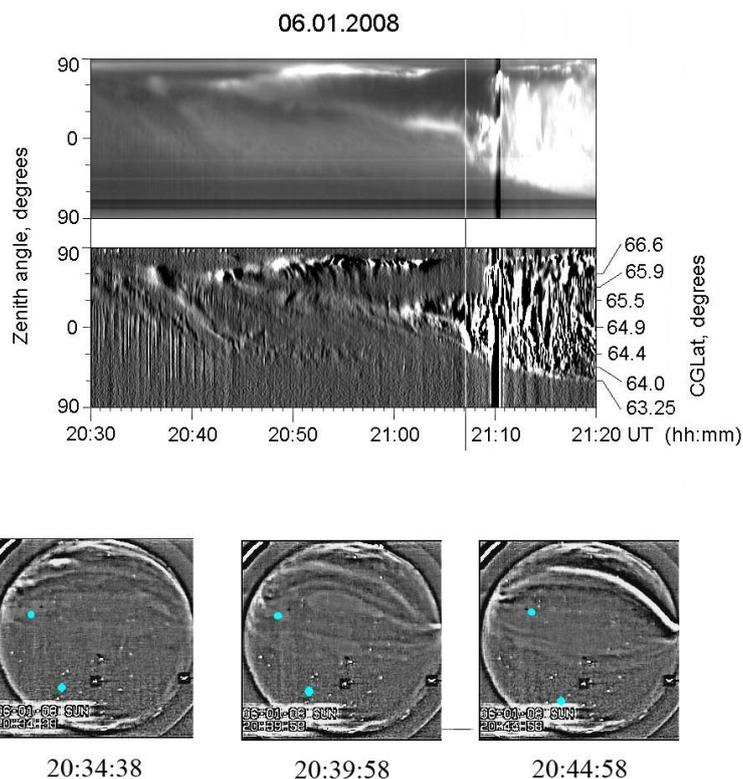


Рис.1. Сверху вниз: исходная и фильтрованная кеограммы, а также характерные all-sky изображения с нанесёнными, согласно модели магнитного поля T96, проекциями спутников ТНС (круги) и ТНА (ромбы) для суббури 06.01.2008

Нами проверены и подтверждены перечисленные ниже основные положения сценария перехода к взрывной фазе суббури, связанного с формированием FLRs в хвосте магнитосферы. Для определённости сравнение выполняется с теоретическими работами Аллана и др. [5, 6], в которых промоделирован процесс установления FLRs внутри магнитосферы как отклик системы на импульсную вариацию азимутального электрического поля в солнечном ветре.

(а). Перед началом события включается импульсный источник на границе магнитосферы (в нашем случае вблизи полярной границы овала на ночной стороне), связанный с резким изменением межпланетного магнитного поля (ММП), динамического давления или азимутального электрического поля  $E_y$  солнечного ветра (см. рис.2, из которого видно, что в период, предшествующий 20:30 UT, имели место вариации импульсного характера во всех трёх компонентах ММП, а также в динамическом давлении и азимутальной компоненте  $E_y$  электрического поля солнечного ветра).

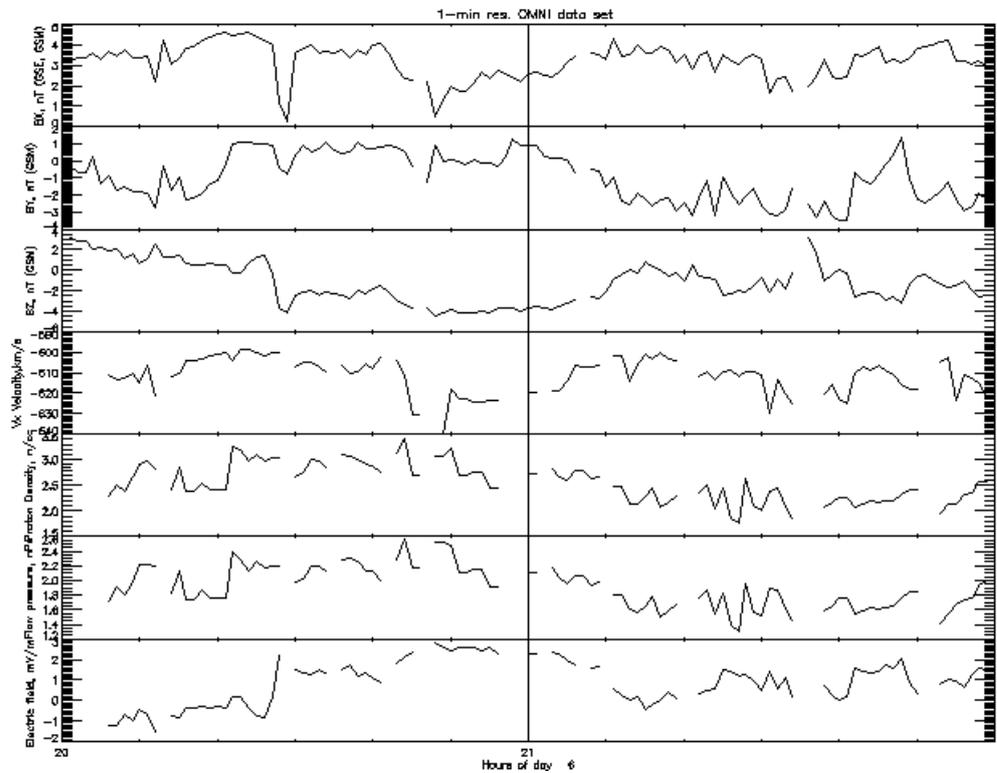


Рис.2. Сверху вниз:  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  компоненты ММП,  $v_x$  компонента скорости, плотность, динамическое давление и азимутальная компонента электрического поля солнечного ветра 06 января 2008 г., 20:00-22:00 UT

(б). Переходный процесс установления FLRs внутри магнитосферы и сопровождающие его волновые формы могут быть схематично представлены, как показано на рис.3а из работы [6], в которой решалась начальная задача для взаимодействующих быстрой и поперечной МГД мод внутри магнитосферы при заданном в  $t = 0$  импульсе  $E_y$  на её границе и была получена временная эволюция

решений (три нижние панели на рис.3а). Из сравнения со спутниковыми наблюдениями (рис.3б) можно видеть сходство волновых форм, регистрируемых спутниками ТНС и ТНА, с решениями, полученными в [6], в частности увеличение частоты колебаний с приближением к Земле, являющееся признаком стоячих альфвеновских волн.

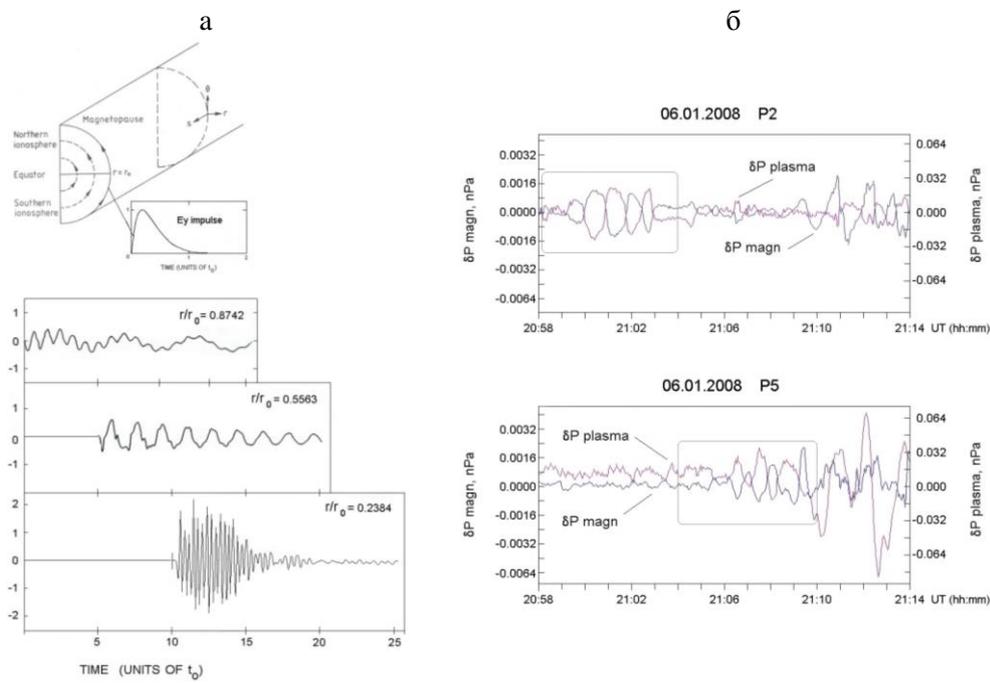


Рис.3. (а) Переходный процесс установления FLRs внутри магнитосферы как отклик на импульсную вариацию азимутального электрического поля  $E_y$  солнечного ветра на границе магнитосферы согласно результатам моделирования, выполненного в [6].

Показаны система координат, вид импульса  $E_y$ , заданного в  $t = 0$  на границе магнитосферы, и волновые пакеты (в радиальном электрическом поле  $E_r$ ), развивающиеся со сдвигом по времени на различных радиальных расстояниях внутри магнитосферы; (б) волновые пакеты, регистрируемые спутниками ТНС и ТНА внутри области распространяющихся к экватору E-W структур (показаны вариации магнитного и плазменного давления, связанные со стоячими колебаниями магнитных силовых трубок, см. также [7])

(в). Как известно, характерные периоды колебаний внутри резонансов обычно составляют 1-10 мин, что совпадает с периодами колебаний, регистрируемых спутниками в рассматриваемом событии. Это видно, например, из вейвлет-спектра флуктуаций плазменного давления, наблюдаемых ТНС в 20:30-20:45 UT, который показан на рис.4.

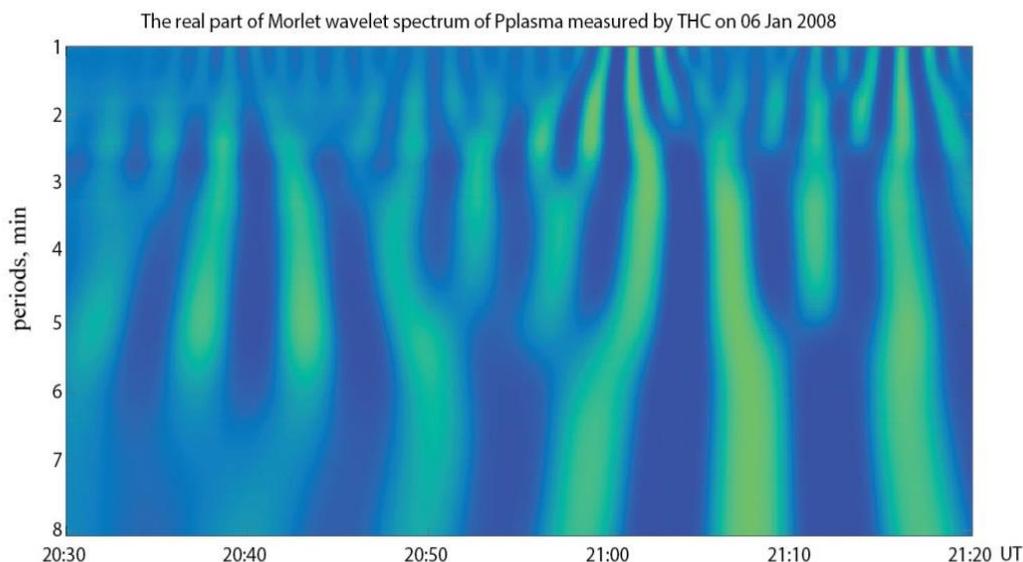


Рис.4. Вейвлет-спектр флуктуаций плазменного давления, наблюдаемых спутником ТНС в событии суббури 06.01.2008

(г). Возмущения типа FLRs, возбуждаемых источником в солнечном ветре, являются локализованными в широтном направлении тороидальными стоячими альфвеновскими волнами, т. е. в них доминируют радиальная компонента электрического поля  $E_r$  (соответственно, азимутальная компонента скорости  $v_\phi$ ) и азимутальная компонента магнитного поля  $B_\phi$ . Эти признаки имеют место в наблюдаемых возмущениях (рис.5а-в).

(д). Оптическим проявлением, по которому можно уверенно отождествить FLR, является периодическая перестройка E-W дуг внутри резонанса, которая связана с перераспределением вытекающего из ионосферы продольного тока на разных фазах стоячих колебаний [4], причём период перестройки равен периоду резонансных колебаний. В нашем случае этот признак проявляется как периодические фазовые распространения к полюсу уярчений на кеограмме (рис.1, средняя панель) в интервале UT = 21:01:30-21:07:00, которые повторяются примерно через 2-3 мин. Таким образом, в рассматриваемом событии предбрейкаповая дуга является авроральным проявлением FLR. Заметим также, что значения периодов 2-3 мин лежат внутри полосы частот колебаний, наблюдаемых спутниками THEMIS.

### Заключение

Можно сделать вывод, что основные положения сценария суббури, основанного на развитии внутри магнитосферы магнитных резонансов в качестве отклика системы на импульсное воздействие, заданное в качестве граничного условия, подтверждаются сопряженными авроральными и спутниковыми наблюдениями в событии 06 января 2008 г.

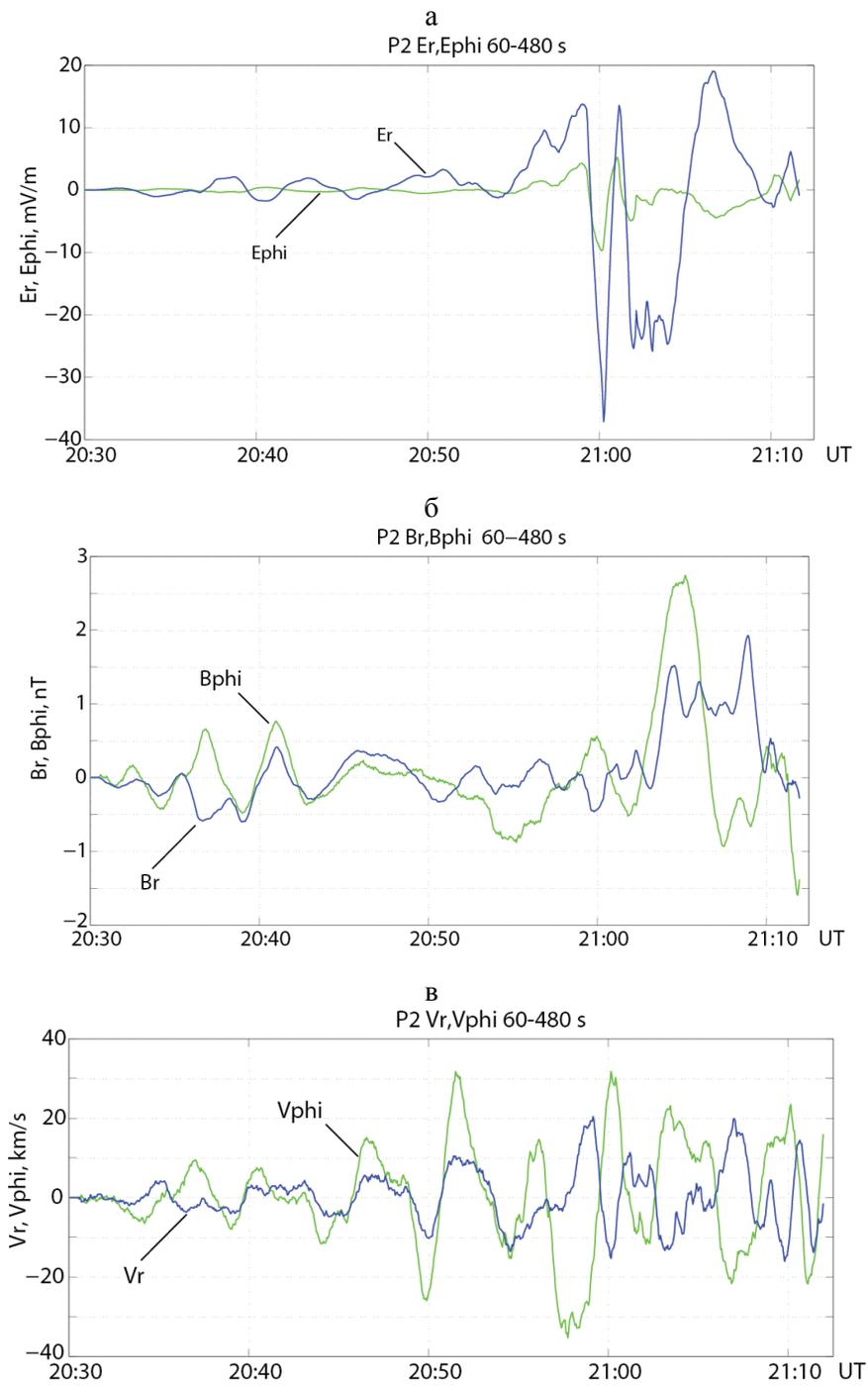


Рис.5. Возмущения с периодами 60-480 сек поперечных к  $B_0$  компонент электрического поля(а), магнитного поля(б), скорости плазмы (в), наблюдаемые спутником ТНС (P2) в событии суббури 06.01.2008

## **Литература**

1. Tamao T. Transmission and coupling resonance of hydromagnetic disturbances in the non-uniform Earth's magnetosphere // Sci. Rep. Tohoku Univ. Geophys. 1966. Vol. 17. P. 43-72.
2. Lui A. T. Y., Murphree J. S. A substorm model with onset location tied to an auroral arc // Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25 (8). P. 1269-1272.
3. Samson J. C., Cogger L. L., Pao Q. Observations of field line resonances, auroral arcs, and auroral vortex structures // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101 (A8). P. 17,373-17,383.
4. Samson J. C., Rankin R., Tikhonchuk V. T. Optical signatures of auroral arcs produced by field line resonances: comparison with satellite observations and modeling // Ann.Geo. 2003. Vol. 21. P. 933-945.
5. Allan W., White S. P., Poulter E. M. Magnetospheric coupling of hydromagnetic waves – initial results // Geophys. Res. Lett. 1985. Vol. 12. P. 287.
6. Allan W., White S. P., Poulter E. M. Impulse-excited hydromagnetic cavity and field-line resonances in the magnetosphere // Planet. Space Sci. 1986. Vol. 34(4). P. 371-385.
7. Golovchanskaya I. V., Kornilov I. A., Kornilova T. A. East-west type precursor activity prior to the auroral onset: ground-based and THEMIS observations // J. Geophys. Res. 2015. Vol.120, doi:10.1002/2014JA020081.

## ***Сведения об авторах***

### **Когай Татьяна Герасимовна,**

стажер-исследователь, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
tan1418@yandex.ru

### **Головчанская Ирина Владимировна,**

д.физ.-мат. н., ученый секретарь, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
golovchanskaya@pgia.ru

### **Корнилов Илья Александрович,**

к.физ.-мат. н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, kornilov@pgia.ru

### **Корнилова Татьяна Андреевна,**

к.физ.-мат. н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, kornilova@pgia.ru

### **Мельник Михаил Николаевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
melnik@pgia.ru

Т. А. Попова

## СОПРЯЖЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ НА НИЗКИХ ВЫСОТАХ И ЭМИЦ-ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ

### Аннотация

Проведен анализ наблюдений ЭМИЦ-волн на магнитосферных спутниках THEMIS и высыпаний протонов на низкоорбитальных спутниках NOAA POES и MetOp. Показано, что в тех случаях, когда траектории низкоорбитальных спутников проходят через проекции областей наблюдения волн, на этих спутниках регистрируются высыпания протонов, расположенные к экватору от изотропной границы.

### Ключевые слова:

*электромагнитные ионно-циклотронные волны, высыпания энергичных протонов, магнитосфера, плазмаосфера.*

Т. А. Popova

## CONJUGATED MEASUREMENTS OF PROTON FLUXES AT LOW ALTITUDES AND EMIC WAVES IN THE MAGNETOSPHERE

### Abstract

The analysis of EMIC waves observed onboard THEMIS spacecraft in the magnetosphere has been performed along with the proton precipitation data from low-orbiting NOAA POES and MetOp satellites. It has been demonstrated that when the trajectories of the magnetospheric and low-orbiting satellites are conjugated, the precipitation of energetic protons located equatorward from the isotropy boundary is observed.

### Keywords:

*electromagnetic ion cyclotron waves, energetic proton precipitation, magnetosphere, plasmasphere.*

### Введение

Поперечная анизотропия протонов кольцевого тока является источником свободной энергии для развития ионно-циклотронной (ИЦ) неустойчивости. В результате неустойчивости происходит генерация электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в диапазоне 0.1-5 Гц, которые на земной поверхности регистрируются как геомагнитные пульсации Pc1-Pc2. Генерация волн должна сопровождаться рассеянием энергичных ( $E = 1-100$  кэВ) протонов по пичч-углам, в том числе и в конус потерь, что приводит к высыпаниям протонов.

На основе статистического сопоставления наземных наблюдений Pc1 и высыпаний протонов на низкоорбитальных спутниках было показано, что с ЭМИЦ-волнами действительно коррелируют высыпания протонов, локализованные внутри зоны анизотропных потоков к экватору от изотропной границы [1]. Было высказано предположение, что такие высыпания можно использовать как индикатор развития ИЦ-неустойчивости в магнитосфере. В то же время надо помнить, что наземные наблюдения не могут точно указать на источник ЭМИЦ-волн, поскольку из-за распространения волн в ионосфере пульсации Pc1 можно наблюдать и вдалеке от источника. Прямым доказательством связи ЭМИЦ-волн в магнитосфере с такими высыпаниями протонов было бы наблюдение протонных высыпаний в сопряженной источнику

волн области. Таких прямых сопоставлений волн и высыпаний протонов пока очень мало, см., например, [1-2].

Чтобы убедиться в правомерности использования протонных высыпаний для диагностики источников ЭМИЦ-волн, представляется важным провести такие сопоставления для большого числа событий. Это можно сделать, в частности, по данным одновременных наблюдений ЭМИЦ-волн вблизи экваториальной плоскости на спутниках THEMIS и высыпаний на низких высотах по данным спутников серии NOAA POES и MetOp.

### **Данные и отбор событий**

Выборка событий для статистики проводилась по данным КА THEMIS-A, -D, -E, апогеи орбит которых в исследуемый период были на дневной стороне магнитосферы. Были просмотрены спектрограммы в диапазоне 0-2 Гц, построенные по данным прибора Fluxgate Magnetometer (FGM) за период с июня по август 2007 г., и отобраны события регистрации поперечных ( $B_{\perp} \gg B_{\parallel}$ ) волн на частотах ниже гирочастоты водорода, т. е. ЭМИЦ-волны. Из этих событий были отобраны те, для которых имелись данные прибора MEPED на сопряженных пролетах низкоорбитальных спутников METOP-02 и NOAA POES-15, -16, -17, -18, работавших в это время. Прибор MEPED измеряет потоки высыпающихся энергичных ( $> 30$  КэВ) электронов и ионов, а также потоки частиц, захваченных на высоте спутника. Термин «сопряженные пролеты» здесь означает, что пролеты спутника имели место в том же секторе MLT (или непосредственно вблизи него), где наблюдались ЭМИЦ-волны. По данным THEMIS, с июня 2007 г., когда началась стабильная работа прибора FGM, по август 2007 г. было найдено 64 события ЭМИЦ-волн. Волны наблюдались в разные часы MLT, на разных расстояниях от Земли, имели различную длительность, характер спектров, частотный диапазон.

### **Результаты**

Рисунки 1-3 показывают пример использованных данных. На рис.1 приведены проекции орбит спутников THEMIS-D, NOAA-18 и METOP-02 для 11 августа 2007 г. Красной линией отмечена область регистрации ЭМИЦ-волн на спутнике THEMIS-D. Синим цветом на траекториях низкоорбитальных спутников показаны области высыпаний протонов экваториальнее изотропной границы. На рис.2 показаны вариации потоков высыпающихся и захваченных частиц на низкоорбитальных спутниках. Отмеченные на рис.1 высыпания наблюдались на широтах 68-73°.

Данные THEMIS-D показаны на рис.3. На двух верхних панелях представлены динамические спектры вариаций поля перпендикулярных и параллельных локальному магнитному полю соответственно (шкала интенсивности приведена справа). Черной линией отмечена локальная гирочастота протонов, штрихпунктирной линией отмечена гирочастота для ионов гелия, а пунктирной – для ионов кислорода. Около 08 UT спутник, двигаясь из переходной области в магнитосферу, пересек магнитопаузу. Зона внутри магнитосферы, в которой регистрировались ЭМИЦ-волны, имеет радиальную протяженность около 3-4  $R_E$ , при этом излучения имеют характер всплесков, подобных тем, которые наблюдаются при резких скачках давления солнечного ветра [3]. Судя по вариациям гирочастот, такие скачки давления действительно имели место.

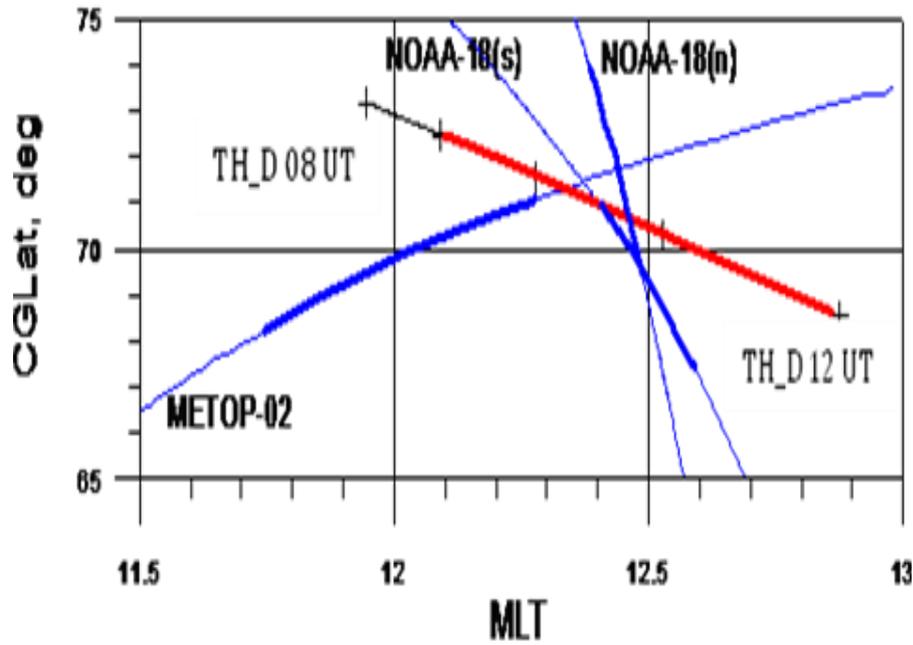


Рис.1. Проекция траекторий спутников и области регистрации ЭМИЦ-волн и высыпаний протонов

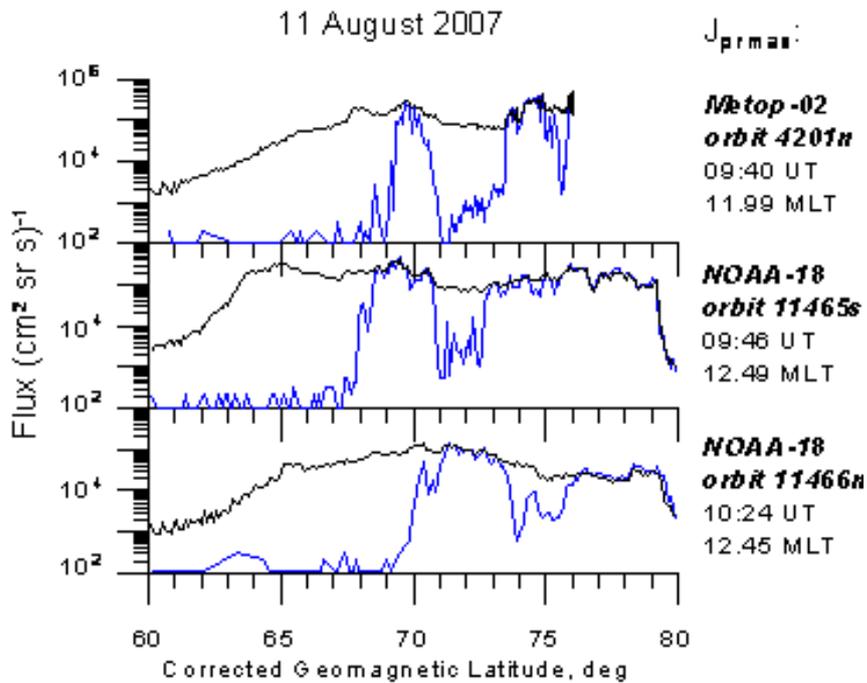


Рис.2. Данные измерений потоков энергичных протонов на спутниках MetOp-02 и NOAA-18. Синей линией показаны значения потока высыпавшихся протонов, черной линией – захваченных

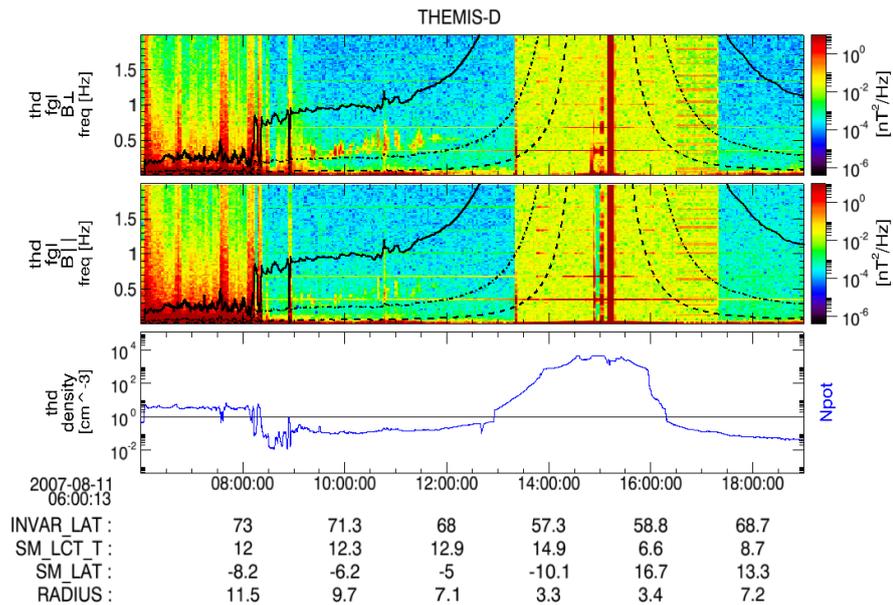


Рис.3. Спектрограмма электромагнитных излучений с 06 до 19 UT 11 августа 2007 г.

На нижней панели представлена концентрация холодной плазмы по данным прибора ESA (Electrostatic Analyzer), также расположенного на борту КА THEMIS. Область с высокими значениями концентрации свидетельствует о пересечении плазмосферы. Из рис.3 следует, что ЭМИЦ-волны на частотах выше гирочастоты гелия наблюдались в области низких значений плотности холодной плазмы вне плазмосферы.

Еще один пример сопоставления данных приведен на рис.4 и 5. Интересным здесь представляется то, что спутниками THEMIS была зарегистрирована довольно резкая смена полосы ЭМИЦ-волн (верхняя панель рис.4). На удалениях, больших чем 8 Re, излучение наблюдалось на частотах выше гирочастоты He+ ( $f_{\text{He}^+}$ ), а ближе к Земле – на частотах ниже этой гирочастоты. На нижней панели показана плотность холодной плазмы. Ясно видно, что смена полосы излучения соответствует пересечению плазмопаузы. Генерация ЭМИЦ-волн в полосе ниже  $f_{\text{He}^+}$  типична для достаточно плотной плазмосферной плазмы. В то же время появление волн в полосе частот выше  $f_{\text{He}^+}$  согласуется с результатами теоретических расчетов, например [4], предсказывающими генерацию ЭМИЦ-волн выше  $f_{\text{He}^+}$  при малых значениях плотности холодной плазмы в областях повышенной анизотропии протонов, которая обычно наблюдается на дневной стороне.

Всего из 64 случаев наблюдения ЭМИЦ-волн было отобрано 34 сопряженных события. В остальных случаях траектории низкоорбитальных спутников либо не пересекали сектор MLT, в котором THEMIS регистрировал волны, либо широты пролетов NOAA и MetOp не соответствовали широтам проекций области ЭМИЦ-волн. Во всех 34 событиях на низкоорбитальных спутниках наблюдались высыпания протонов, подобные тем, что показаны на рис.2 и 5.

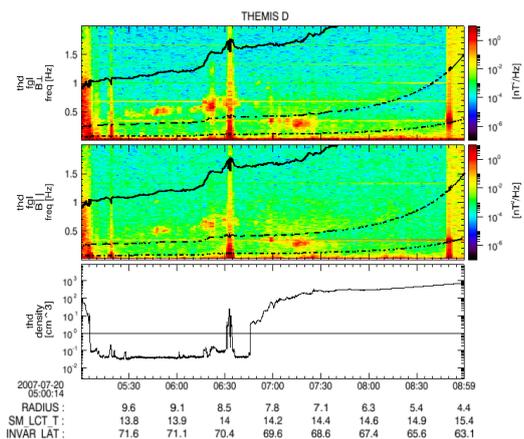


Рис.4. Спектрограмма электромагнитных излучений с 4 до 9 UT 20 июля 2007 г.

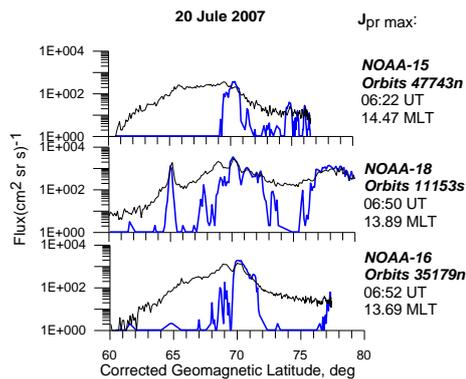


Рис.5. Потоки высыпающихся и захваченных энергичных протонов во время пульсаций 20 июля 2007 г.

### Заключение

Итак, рассмотрение около 60 событий показало, что источник ЭМИЦ-волн сопряжен с высыпаниями энергичных протонов к экватору от границы изотропии, что доказывает возможность использования регистрации высыпаний протонов для мониторинга ИЦ-неустойчивости в приземной магнитосфере. Высыпание энергичных протонов происходит независимо от вида спектра излучения, в частности, от того в гелиевой или водородной полосе происходит генерация ЭМИЦ-волн. Последнее, в свою очередь, определяется условиями генерации (в частности величиной плотности холодной плазмы).

**Благодарности.** Автор благодарит А. Г. Яхнина за постановку задачи и обсуждения. Работа выполнялась в рамках проекта РФФ 15-12-20005.

### Литература

1. Yahnin A. G., Yahnina T. A. Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. Vol. 69/14. P. 1690-1706, doi: 10.1016/j.jastp.2007.02.010.
2. Multipoint observations of Pc1-2 waves in the afternoon sector / S. K. Morley, S. T. Ables, M. D. Sciffer, B. J. Fraser // *J. Geophys. Res.* 2009. 114. A09205, doi:10.1029/2009JA014162
3. Взаимосвязь между скачками динамического давления солнечного ветра, вспышками протонных сияний и геомагнитными пульсациями в диапазоне Pc1 / Т. А. Попова, А. Г. Яхнин, Т. А. Яхнина, Х. Фрей / *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2010. Т. 50, №. 5. С. 595-602.
4. Chen L., Thorne R. M., Horne R. B. Simulation of EMIC wave excitation in a model magnetosphere including structured high-density plumes // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. A07221, doi:10.1029/2009JA014204.

### Сведения об авторе

**Попова Татьяна Аркадьевна,**

стажер-исследователь, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, tarkada@yandex.ru

**В. Б. Белаховский, В. Г. Воробьев, В. А. Билин**

## **ОТКЛИК НОЧНЫХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ SI ИМПУЛЬС**

### **Аннотация**

Детально исследован отклик ночных полярных сияний на резкое уменьшение динамического давления солнечного ветра с использованием данных меридиональных сканирующих фотометров сети NORSTAR, камер всего неба сети THEMIS. Показано, что отклик ночных полярных сияний имеет неоднозначный характер: в момент SI- импульса происходит возбуждение дискретной дуги сияний, спустя около 8 мин после SI- наблюдается резкое уменьшение интенсивности диффузного свечения.

### **Ключевые слова:**

*солнечный ветер, магнитосфера, ионосфера, отрицательный SI-импульс, полярные сияния.*

**V. B. Belakhovsky, V. G. Vorobjev, V. A. Bilin**

## **THE RESPONSE OF THE NIGHTTIME AURORA TO THE NEGATIVE SI IMPULSE**

### **Abstract**

In this study the response of the nighttime aurora to the sudden decrease of the solar wind dynamic is considered in detail using NORSTAR meridian-scanning photometers, THEMIS network all-sky imagers. It has been shown that the response of the nighttime aurora has a complicated character: at the moment of SI- impulse the excitation of the aurora arc were occurred, approximately 8 minutes after SI- an abrupt decrease of the diffuse aurora intensity was observed.

### **Keywords:**

*solar wind, magnetosphere, ionosphere, negative SI impulse, aurora.*

### **Введение**

Изучению SSC (*storm sudden commencement*) импульсов и особенностям отклика магнитосферы на SSC импульсы посвящено достаточно много работ, поскольку именно SSC может являться индикатором начала геомагнитной бури. SSC импульс (а также положительный SI+ импульс) характеризуется резким увеличением динамического давления солнечного ветра. Характеристики полярных сияний во время SSC были исследованы с помощью наземных [1] и спутниковых наблюдений [2]. В работе [2] введен термин “*shock-aurora*”, связанный с появлением полярных сияний во время SSC.

SI- импульс характеризуется резким уменьшением динамического давления солнечного ветра. В работе [3] было установлено, что причиной SI- импульсов являются тангенциальные разрывы. SI- и SI+ импульсы наблюдаются очень часто в паре, причем сначала может идти как SI-, так и SI+.

В работе [4] было обнаружено резкое уменьшение риометрического поглощения при SI- в утреннем секторе, однако отклик в сияниях имел сложный характер. В работе [5] по наблюдениям на камере всего неба было обнаружено, что яркость дискретных дуг после SI- импульса увеличилась и полярные сияния стали двигаться к полюсу. По мнению авторов, резкое увеличение продольных токов, вызванное SI- импульсом, при возбуждении резонанса силовых линий внутри магнитосферы привело к уярчению дискретных дуг. Вместе с тем,

в случаях, рассмотренных в работе [6] с помощью ультрафиолетового приемника со спутника POLAR в эмиссиях 160-180 нм, наблюдалось уменьшение яркости диффузных полярных сияний после SI-.

Таким образом, вопрос отклика полярных сияний на отрицательный SI-импульс остается открытым. В данной работе детально рассмотрен отклик ночных полярных сияний для события 28 сентября 2009 г. с использованием наземных оптических наблюдений сетей NORSTAR, THEMIS (Канада).

**Данные наблюдений.** В работе для наблюдения за полярными сияниями использованы 1-минутные данные меридиональных сканирующих фотометров сети NORSTAR (Канада). Это станции GILL ( $\Phi'=66.03^\circ$ ,  $\Lambda'=333.05^\circ$ ,  $MLT=UT-6.4$ ), RANK ( $\Phi'=72.22^\circ$ ,  $\Lambda'=335.97^\circ$ ,  $MLT=UT-6.2$ ), FSMI ( $\Phi'=67.28$ ,  $\Lambda'=306.9$ ,  $MLT=UT-8.1$ ), PINA ( $\Phi'=59.98$ ,  $\Lambda'=331.75$ ,  $MLT=UT-6.5$ ). Фотометры сети NORSTAR регистрируют полярные сияния в эмиссиях 557.7, 630.0, 486.0, 471.0 нм и выдают данные для 17 углов. Также для наблюдения за полярными сияниями были использованы данные камер всего неба сетей THEMIS. Эти камеры всего неба не оснащены эмиссионными фильтрами. Для наблюдения за наземным магнитным полем использовались магнитометры сетей CARISMA, THEMIS. Используются риометры сети NORSTAR. Наземные станции показаны на рис. 1.

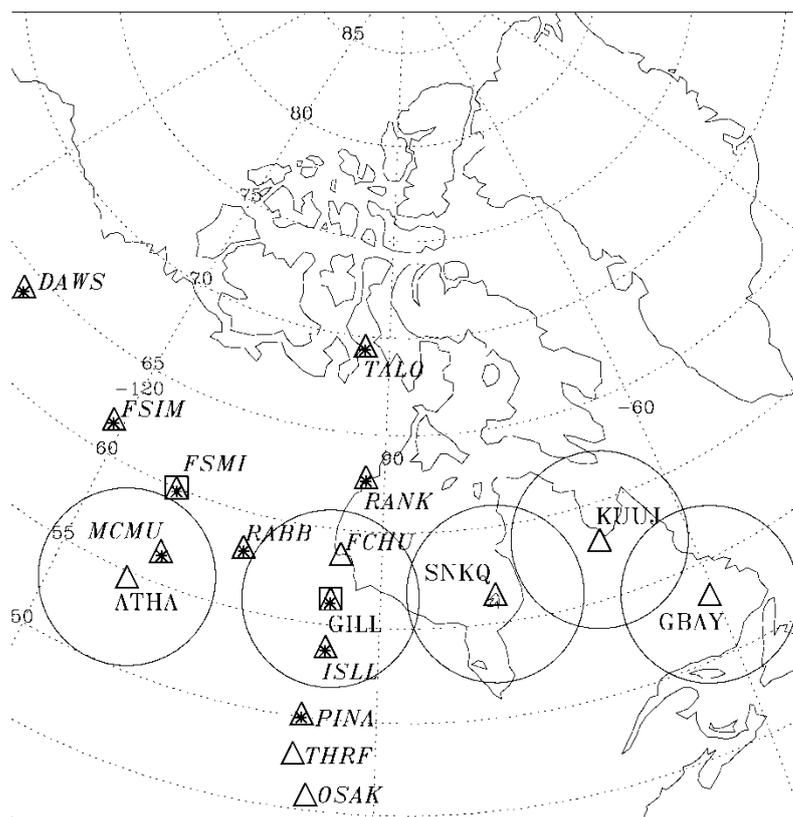


Рис. 1. Карта расположения наземных станций. Треугольниками обозначены магнитометры, звездочками – риометры, квадратами – фотометры, большие круги – камеры всего неба

Также в работе использованы данные геостационарных спутников GOES, спутников THEMIS, межпланетных спутников ACE, WIND, GEOTAIL. Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) брались из базы данных OMNI.

### **Событие 28 сентября 2009 г.**

#### ***Геофизическая обстановка и параметры межпланетной среды***

Примерно в 06.50 UT на земной поверхности по вариациям SYM-H индекса был зарегистрирован отрицательный SI- импульс (рис.2.). Отрицательный SI- импульс наблюдался не в паре с положительным SI+ импульсом. SYM-H-индекс уменьшился с 9 до -20 нТл. Резкое уменьшение плотности солнечного ветра  $N$  вблизи головной ударной волны примерно с 35 до 10 см<sup>-3</sup>, сопровождающееся резким увеличением модуля  $B$  межпланетного магнитного поля (ММП), было зарегистрировано примерно в 06.45 UT (рис.2). Динамическое давление солнечного ветра уменьшилось примерно с 7 до 2 нПа. Скорость солнечного ветра была невысока и составляла около 325 км/с. Интересно, что Vz-компонента ММП долгое время была отрицательна до и после SI- импульса, что привело к развитию суббури через полчаса после SI- импульса в канадском секторе. В момент SI- импульса AE-индекс имел значение 250-350 нТл, т. е. суббуревой активности не наблюдалось.

#### ***Геомагнитные вариации на земной поверхности и в магнитосфере***

На рисунке 3 показаны вариации геомагнитного поля ( $X$ -компонента) по данным меридиональной цепочки станций сети CARISMA. На низкоширотных станциях (OSAK, THRF) SI- импульс виден достаточно четко. На более высокоширотных же станциях вслед за резким уменьшением  $X$ -компоненты геомагнитного поля следует такой же резкий рост. Во время SI- данная цепочка станций располагалась в ночном секторе (1 час MLT). Также резкое уменьшение геомагнитного поля наблюдалось и на станциях сети IMAGE, 210-meridian (не показано). Таким образом, SI- импульс имел глобальный характер.

На спутнике GOES-12 (MLT=UT-5), сопряженная точка которого располагалась вблизи меридиональной цепочки станций сети CARISMA, азимутальная  $h_p$ -компонента геомагнитного поля в момент SI- импульса резко уменьшается (не показано). То есть азимутальная компонента геомагнитного поля коррелирует с горизонтальной  $X$ -компонентой геомагнитного поля на Земле. Это говорит о повороте оси эллипса поляризации SI- импульса на  $\pi/2$  при переходе через ионосферу. При этом на GOES-12 наблюдается рост модуля геомагнитного поля  $B$ .

Спутник THEMIS-A до SI-, по-видимому, располагался в магнитослое (в точке с координатами (9, 5, 1) Re в системе GSM). Об этом свидетельствуют сильные флуктуации магнитного поля (не показано). После же SI- вариации магнитного поля стали менее зашумленными, что, по всей видимости, говорит о расширении магнитосферы при SI- и прохождении магнитопаузы через спутник THEMIS-A, который после SI- оказался уже в магнитосфере.

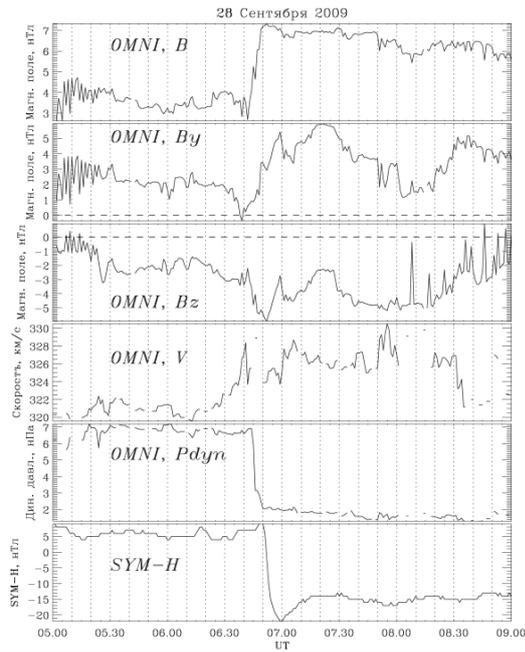


Рис.2. Параметры ММП (модуль  $B$  магнитного поля,  $B_y$ -,  $B_z$ -компоненты) и солнечного ветра (скорость  $V$ , динамическое давление  $P_{dyn}$ ) по данным базы OMNI, SYM-H-индекс 28.09.2009 в интервале 05.00-09.00 UT

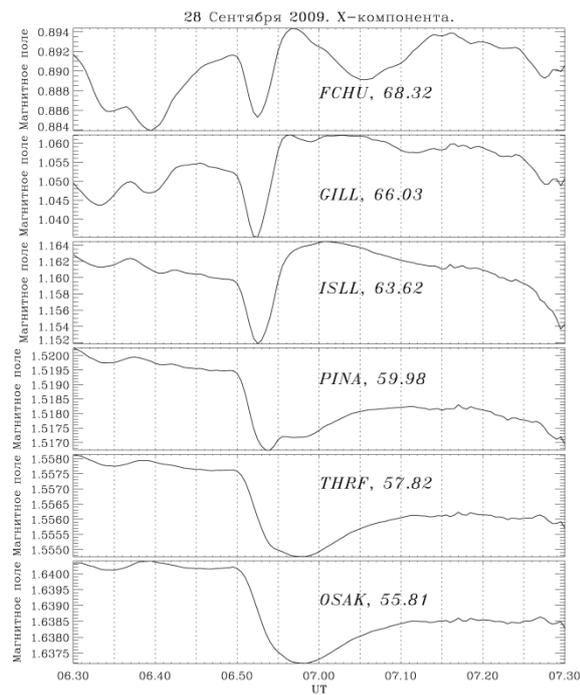


Рис.3. Вариации X-компоненты геомагнитного поля [ $\text{nT} \cdot 10^4$ ] по данным станций THRF-OSAK-PINA-ISLL-GILL-FCHU на меридиональном профиле  $\sim 330^\circ$  28.09.2009 в интервале 06.30-07.30 UT

### Отклик полярных сияний и риометрического поглощения

Отклик в полярных сияниях на SI- импульс был виден далеко не на всех станциях сетей THEMIS, NORSTAR, т. е. отклик имел локальный характер. Практически сразу же после SI- импульса по данным камеры всего неба на станции SNKQ ( $\Phi'=66.45^\circ$ ,  $\Lambda'=356.99^\circ$ ,  $MLT=UT-4.8$ ) наблюдается возбуждение дуги полярных сияний (рис.4). Интенсивность свечения увеличилась более чем в 2.5 раза. При этом дуга сияний распространялась к полюсу, что может свидетельствовать о проявлении резонансных свойств в авроральной светимости. По данным камеры всего неба дуга вытянута в направлении восток-запад (рис.4). По данным фотометра на станции GILL ( $CGL=66^\circ$ ) наблюдается резкое уменьшение интенсивности диффузного свечения в эмиссиях кислорода 557.7, 630.0 нм (рис.5), а также в эмиссии водорода 486.0 нм (не показано) примерно через 8 мин после SI- импульса. Интенсивность свечения в эмиссии 486.0 нм была достаточно слабая.

Станции GILL, SNKQ разнесены по геомагнитной долготе на  $24^\circ$ , находятся примерно на одной геомагнитной широте. Наблюдалась также дискретная дуга сияний слабой интенсивности и на станции KUUI ( $\Phi'=66.89^\circ$ ,  $\Lambda'=13.23^\circ$ ,  $MLT=UT-3.7$ ).

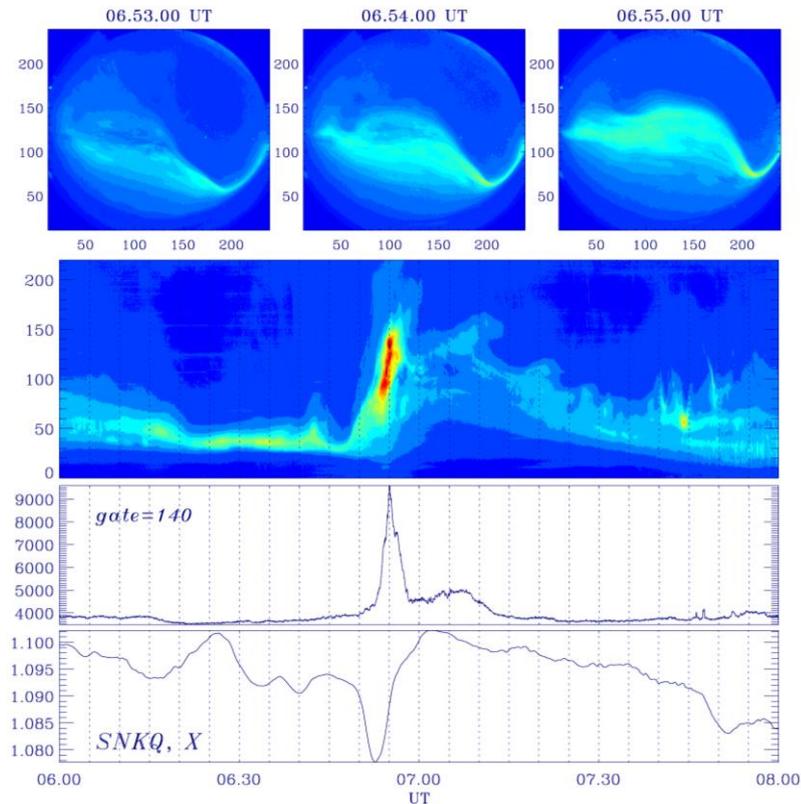


Рис.4. Кадры камеры всего неба на станции SNKQ, кеограмма по данным на станции SNKQ [отн. ед.], широтный разрез интенсивности полярных сияний [отн. ед.], X-компонента геомагнитного поля [ $\text{нТл} \cdot 10^4$ ] на станции SNKQ 28.09.2009 в интервале 06.00-08.00 UT

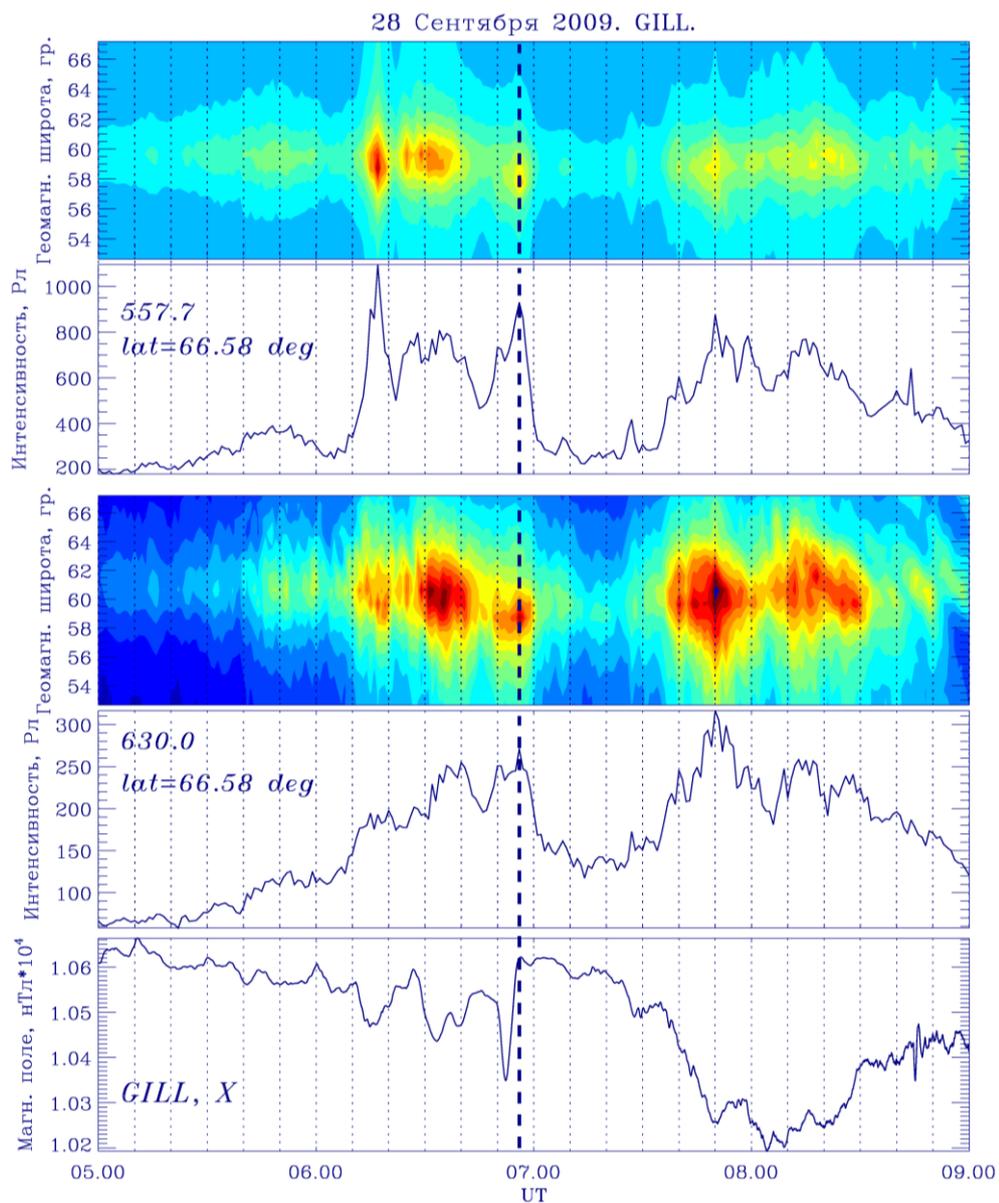


Рис.5. Кограммы интенсивности полярных сияний [Рл] по данным меридионального сканирующего фотометра на станции GILL в эмиссиях 557.7, 630.0 нм, широтные разрезы интенсивности сияний, X-компонента геомагнитного поля [нТл·10<sup>4</sup>] по данным станции GILL 28.09.2009 в интервале 05.00-09.00 UT

На более низкоширотной и расположенной восточнее станции GBAY ( $\Phi'=60.73^\circ$ ,  $\Lambda'=23.08^\circ$ ,  $MLT=UT-3$ ) также наблюдалось резкое уменьшение интенсивности пятна диффузного свечения (не показано), распространяющегося к полюсу.

Интересно, что по данным риометров сети NORSTAR не наблюдалось отклика в риометрическом поглощении на SI- импульс. Это говорит об отсутствии отклика в потоках высыпающихся в ионосферу электронов с энергией порядка 30 кэВ. Общий уровень риометрического поглощения был невысокий. К сожалению, в нашем распоряжении не было данных спутников LANL. Но поскольку риометрическое поглощение хорошо коррелирует с потоками энергичных электронов на LANL, то можно предположить, что не было отклика также и в потоках захваченных электронов в магнитосфере на SI- импульс в ночном секторе. Также не наблюдалось отклика на SI- импульс по данным скандинавских риометров, которые в момент SI- располагались в утреннем секторе.

### Обсуждение

Рассмотренный в работе отрицательный SI- импульс 28 сентября 2009 г., связанный с резким уменьшением динамического давления солнечного ветра, имел глобальный характер, т. е. наблюдался в различных секторах магнитосферы. При этом по данным спутника THEMIS-A во время SI- импульса происходило увеличение размеров магнитосферы, поскольку было зафиксировано прохождение магнитопаузы через данный спутник.

Казалось бы, при отрицательном SI- импульсе должен произойти зеркальный отклик сияний по отношению к отклику сияний на SSC (SI+) импульс. Однако, как показано в работе, отклик ночных полярных сияний на SI- импульс был более сложным. Отклик в сияниях имел локальный характер и был виден только на нескольких станциях. Причем он был исследован на гораздо большем пространственном масштабе, чем в работе [5], поскольку была использована целая сеть камер всего неба THEMIS. Одним из возможных источников для возбуждения дуги полярных сияний может быть резонанс силовых линий внутри магнитосферы (FLR, *field line resonance*) [7]. В пользу данного механизма говорит распространение дуги полярных сияний к высоким широтам. SI- импульс может быть триггером для возбуждения резонанса силовых линий внутри магнитосферы на отдельных  $L$ -оболочках. К тому же, к моменту SI- импульса магнитосфера была уже достаточно “загружена” энергией солнечного ветра вследствие длительной отрицательной  $B_z$ -компоненты ММП.

Более же позднее уменьшение интенсивности диффузного свечения, видимое на станциях GILL, GBAY, по-видимому, связано с расширением магнитосферы и соответствующим изменением условий высыпания заряженных частиц в ионосферу. Расширение магнитосферы привело к уменьшению компоненты сжатия геомагнитного поля  $b_{||}$  и, как следствие, к изменению питч-углового распределения заряженных частиц. В работе [6] отмечается, что уменьшением интенсивности сияний происходило примерно через 10 мин после SI- импульса, что в целом согласуется и с нашими наблюдениями.

В данной работе на примере одного события получено подтверждение двух противоположных результатов, полученных в работах [5] и [6]. Во время SI- импульса в магнитосфере могут запускаться различные геофизические явления, что и приводит к сложному отклику полярных сияний на отрицательный SI- импульс.

### **Вывод**

Таким образом, нами показана неоднозначность отклика ночных полярных сияний на отрицательный SI- импульс. А именно, при отрицательном SI- импульсе с одной стороны наблюдается появление дискретной дуги сияний, с другой стороны наблюдается резкое уменьшение интенсивности диффузного свечения в эмиссиях 557.7, 630.0, 486.0.

**Благодарности.** Данная работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-4210.2015.5 (БВ), Программы Президиума РАН № 9. Выражаем благодарность за предоставленные данные проектов NORSTAR, THEMIS, CARISMA, спутника GOES сотрудникам соответствующих центров.

### **Литература**

1. Воробьев В. Г. Эффекты в полярных сияниях, связанные с SC // Геомагнетизм и аэрономия, 1974. Т. 14, № 1. С. 90-92.
2. Shock aurora: FAST and DMSPP observation / X. - Y. Zhou, R. J. Strangeway, P. C. Anderson, D. G. Sibeck, B. T. Tsurutani, G. Haerendel, H. U. Frey, J. K. Arballo // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. A 4. P. 009701.
3. Geomagnetic negative sudden impulses: Interplanetary causes and polarization distribution / T. Takeuchi, T. Araki, A. Viljanen, J. Watermann // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. A 7. P. 900152.
4. Belakhovsky V. B., Safargaleev V. V., Yagodkina O. I. Response of the morning auroras and cosmic noise absorption to the negative solar wind pressure pulse: a case study // Optica Pura Apl. 2011. 44 (4). P. 611-615.
5. Enhancement of optical aurora triggered by the solar wind negative pressure impulse (SI-) / N. Sato, Y. Murata, H. Yamagishi, A. S. Yukimatu, M. Kikuchi, M. Watanabe, K. Makita, H. Yang, R. Liu, F. J. Rich. // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol 28. P. 127. Global auroral response to negative pressure impulses / K. Liou, P. T. Newell, T. Sotirelis, C. - I. Meng // Geophys. Res Lett. 2006. Vol. 33. L11103.
6. Field line resonance interference model for multiple auroral arc generation W. Lyatsky, R.D. Elphinstone, Q. Pao, L.L. Cogger // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. A 1, P. 263-268.

### **Сведения об авторах**

**Белаховский Владимир Борисович,**

к.физ.-мат.н., научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, belakhov@mail.ru

**Воробьев Вячеслав Георгиевич,**

д.физ.-мат.н., заведующий лабораторией полярных сияний, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, vorobjev@pgia.ru

**Билин Владислав Андреевич,**

лаборант, Полярный геофизический институт, г. Апатиты

УДК 621.311+551.594.221:551.506

**А. В. Бурцев, Ю. М. Невретдинов**

## **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИСТРАЦИЙ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ В 2013-2014 гг.**

### **Аннотация**

Приведены результаты обработки регистрации грозовой активности на Кольском полуострове за период 2013-2014 гг. Отмечены значительные колебания грозовой активности, а также неравномерность распределения разрядов молнии по территории региона. Предложено при оценке эффективности молниезащиты объектов электроэнергетики в районах с низкой интенсивностью гроз применять показатель плотности разрядов на землю с учетом распределения их в конкретном регионе.

### **Ключевые слова:**

*Boltek StormTracker, разряды молнии, распределение разрядов молнии, плотность разрядов на землю.*

**A. V. Burtsev, Y. M. Nevretdinov**

## **ANALYSIS OF REGISTRATION RESULTS OF LIGHTNING DISCHARGES ON THE KOLA PENINSULA IN 2013-2014**

### **Abstract**

Results of registration processing of storm activity on the Kola Peninsula during 2013-2014 are given. The considerable fluctuations of storm activity and non-uniformity of lightning discharges distribution are recorded in the region. It is offered to use a cloud-to-ground discharge density indicator taking into account their distribution in the region assessing lightning protection efficiency of power generation facilities in the areas with low thunder-storms intensity.

### **Keywords:**

*Boltek StormTracker, lightning, lightning distribution, lightning strike density.*

### **Введение**

С 2013 г. в Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН ведется регистрация грозовой активности, которая показывает распределение плотности разрядов молний на территории Кольского полуострова и прилегающих территорий и акваторий [1, 2].

К особенностям Кольского региона можно отнести сложность реализации требований к исполнению грозозащитных мероприятий, таких как заземляющие устройства и тросовая защита, из-за низкой проводимости грунта. Интенсивность грозовой деятельности принято определять числом грозových часов или грозových дней в году, вычисляемым как среднеарифметическое значение за ряд лет наблюдений для определенного места земной поверхности. Грозовая деятельность для данного региона по нормативным документам (ПУЭ, РД) [3, 4] оценивается как низкая – от 20 до 30 грозových часов для южной части региона и менее 10 для центральной и северной части. По данным эксплуатации грозовая активность может меняться от 10 до 45 грозových часов в году [1]. При этом отмечается значительная неравномерность среднего числа грозových отключений ЛЭП 110-330 кВ в регионе, что можно объяснить либо неравномерностью распределения разрядов молнии, либо различиями

эффективности грозозащиты линий. Очевидные расхождения сведений из ПУЭ и РД с эксплуатационными данными явились предпосылкой к началу исследования характеристик грозовой деятельности на территории Кольского региона.

В лаборатории ЦФТПЭС установлена система StormTracker канадской фирмы Voltek, которая предназначена для обнаружения атмосферных электрических разрядов (молний) на удалении до 480 км от места расположения базовой станции. Регистрация разрядов молний происходит круглосуточно в автоматическом режиме посредством программного обеспечения (ПО) NexStorm Lite фирмы Astrogenic, идущего в комплекте с системой StormTracker. Зарегистрированные события отображаются на карте в полярной системе координат, центром которой является г. Апатиты. Похожие системы длительное время функционируют в некоторых регионах России [5, 6], а также во многих странах мира [7]. В лаборатории ЦФТПЭС ПО, идущее в комплекте, используется исключительно для регистрации разрядов молний. Для обработки полученных результатов используются собственные программные разработки [8, 9]. Для определения числа грозовых часов и построения карты распределения грозовых часов разработан специальный алгоритм [10], согласно которому посредством перебора всех событий и всех ячеек рассматриваемой области определяется значение грозовых часов для каждой ячейки.

#### Результаты регистрации 2013 г.

По результатам регистраций длительность грозового сезона 2013 г. составила 100 дней. Начало сезона для Мурманской области определилось первой грозой 4 июня. Последняя гроза в области зарегистрирована 12 сентября. Статистические данные грозового сезона 2013 г. приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистика грозовых разрядов по месяцам 2013 г.

Период	Разряды молнии на землю		Междуоблачные разряды	
	CG+	CG-	IC+	IC-
Сезон	Всего разрядов молнии – 36233 (100 %)			
	7961 (22 %) / (100 %)		28272 (78 %) / (100 %)	
	3124	4837	13676	14596
	39.2 %	60.8 %	48.4 %	51.6 %
Июнь с 4 по 30	Всего разрядов молнии – 12749 (100%)			
	954	1910	4364	5521
	7.5 %	15.0 %	34.2 %	43.3 %
Июль	Всего разрядов молнии – 17573 (100 %)			
	1455	2380	7440	6298
	8.3 %	13.5 %	42.3 %	35.9 %
Август	Всего разрядов молнии – 5202 (100 %)			
	668	492	1585	2457
	12.8 %	9.5 %	30.5 %	47.2 %
Сентябрь с 1 по 12	Всего разрядов молнии – 709 (100 %)			
	47	55	287	320
	6.6 %	7.8 %	40.5 %	45.1 %

Как видно, число наземных разрядов составляет всего 22 % от общего числа разрядов. В среднем менее 40 % наземных разрядов имеет положительную полярность, что значительно превышает средний показатель 10 % [11].

По полученным за 2013 г. данным с использованием ранее разработанного программного обеспечения построена карта пространственного распределения грозовых разрядов (рис.1). Карта разбита на 900 ячеек – 30 по вертикали и 30 по горизонтали. Такой формат выбран для наиболее комфортного визуального представления данных. Площадь каждой ячейки составляет 711 км<sup>2</sup> (квадрат со стороной 26.6 км). На карте показано число ударов молнии на землю (в пределах одной ячейки) за весь грозовой сезон.

Итоговые результаты показали значительную неравномерность распределения грозовых разрядов (от 0 до 18 ударов в ячейку). Основные зоны активности расположены в горном массиве Хибины и в северо-восточной части Кольского полуострова, а также прилегающей акватории Баренцева моря. Высокая грозовая активность наблюдается в северной части Финляндии в районе Рованиеми и Соданкюля.

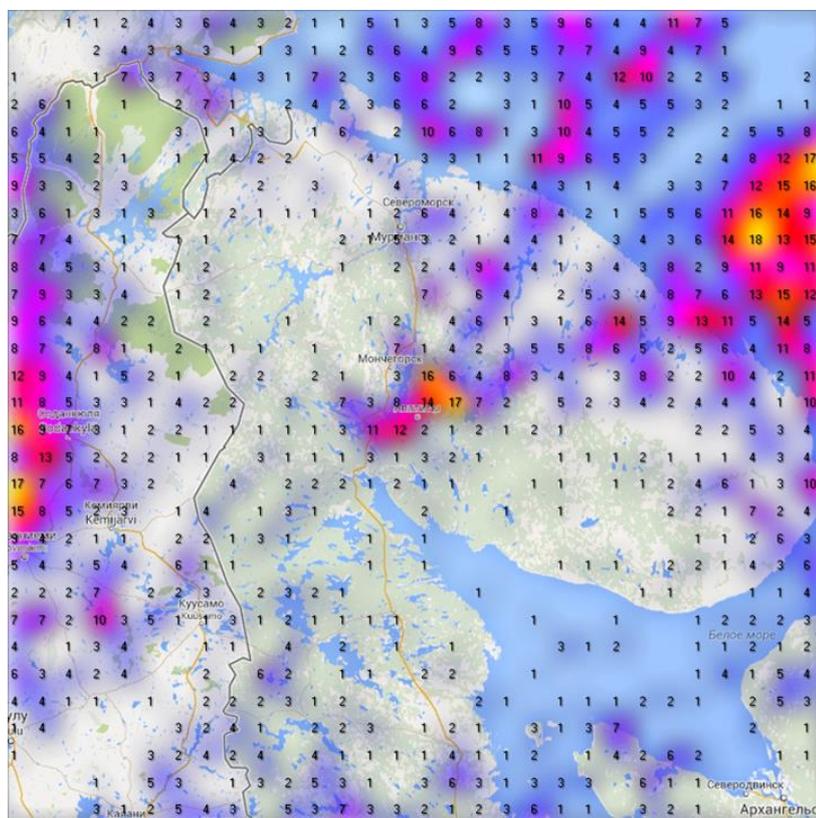


Рис.1. Территориальное распределение грозовых разрядов в 2013 г.

На основе анализа данных регистрации 2013 г. по разработанному алгоритму [10] была построена карта территориального распределения грозовых часов (рис.2.) Как видно, число часов по результатам регистраций в 2013 г. существенно отличается от данных ПУЭ и РД.

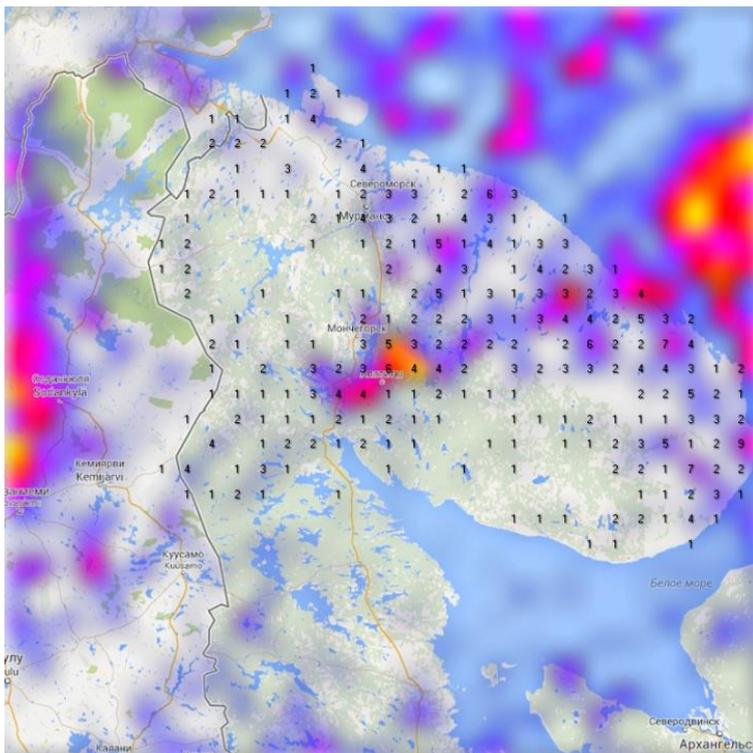


Рис.2. Территориальное распределение грозных часов в 2013 г.

### Результаты регистрации 2014 г.

Грозовой сезон 2014 г. определился началом гроз 13 мая и завершением 4 сентября, длительность составила 113 дней. Статистические данные грозового сезона 2014 г. приведены в табл.2.

В 2014 г. относительное число наземных разрядов составило 32.9 %. При этом наземных разрядов с положительной полярностью зарегистрировано около 28 %.

По результатам регистраций 2014 г. построена карта пространственного распределения грозных разрядов (рис.3). Полученные при регистрации данные показали значительную неравномерность распределения грозных разрядов (от 0 до 221 ударов в ячейку). При сравнении с результатами 2013 г. прослеживаются ярко выраженные очаги повышенной концентрации грозных разрядов в районе горного массива Хибины, а также в северной, северо-восточной части Кольского полуострова. Отмечается высокая концентрация распределения разрядов в акватории Баренцева моря, на северо-востоке Мурманской области, что можно объяснить столкновением холодного Арктического фронта с теплым течением Гольфстрим. Наибольшая интенсивность молний наблюдалась в районе горного массива Хибины (порядка 1000 разрядов), а также в северной, северо-восточной части Кольского полуострова (порядка 5000 разрядов). Количество разрядов в 2014 г. на этих участках почти в 5 раз превышают аналогичные показатели 2013 г. Карта территориального распределения грозных часов по Мурманской области за 2014 г. приведена на рис.4.

Таблица 2

Статистика грозных разрядов по месяцам 2014 г.

Период	Разряды молнии на землю		Междуоблачные разряды	
	CG+	CG-	IC+	IC-
Сезон	Всего разрядов молнии – 98233 (100 %)			
	32282 (32.9 %) / (100 %)		65951 (67.1 %) / (100 %)	
	8993	23289	31370	34581
	27.8 %	72.2 %	47.6 %	52.4 %
Май с 13 по 31	Всего разрядов молнии – 3324 (100 %)			
	249	551	1249	1275
	7.5 %	16.6 %	37.6 %	38.3 %
Июнь	Всего разрядов молнии – 27904 (100 %)			
	2437	6520	7523	11424
	8.7 %	23.4 %	27.0 %	40.9 %
Июль	Всего разрядов молнии – 43090 (100 %)			
	3785	11605	14312	13388
	8.8 %	26.9 %	33.2 %	31.1 %
Август	Всего разрядов молнии – 23676 (100 %)			
	2482	4607	8243	8344
	10.5 %	19.4 %	34.8 %	35.3 %
Сентябрь с 1 по 4	Всего разрядов молнии – 239 (100 %)			
	40	6	43	150
	16.7 %	2.5 %	18.0 %	62.8 %

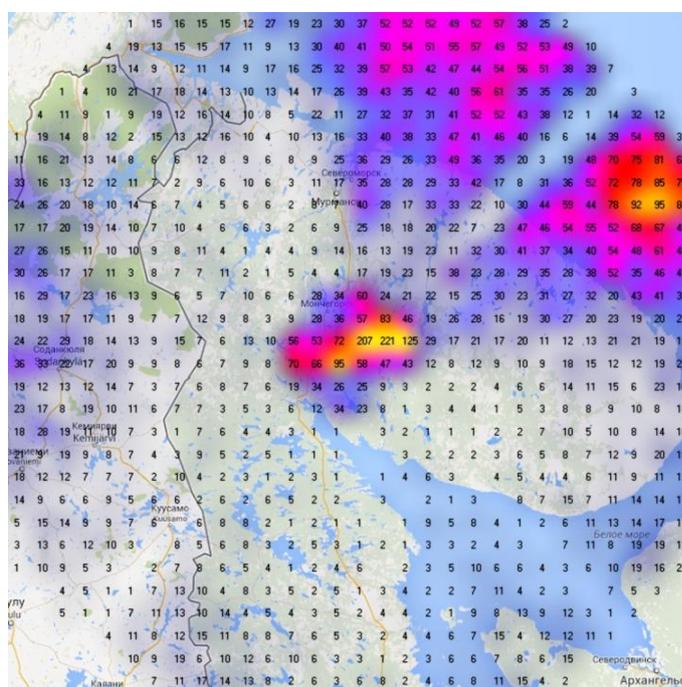


Рис.3. Территориальное распределение грозных часов в 2014 г.

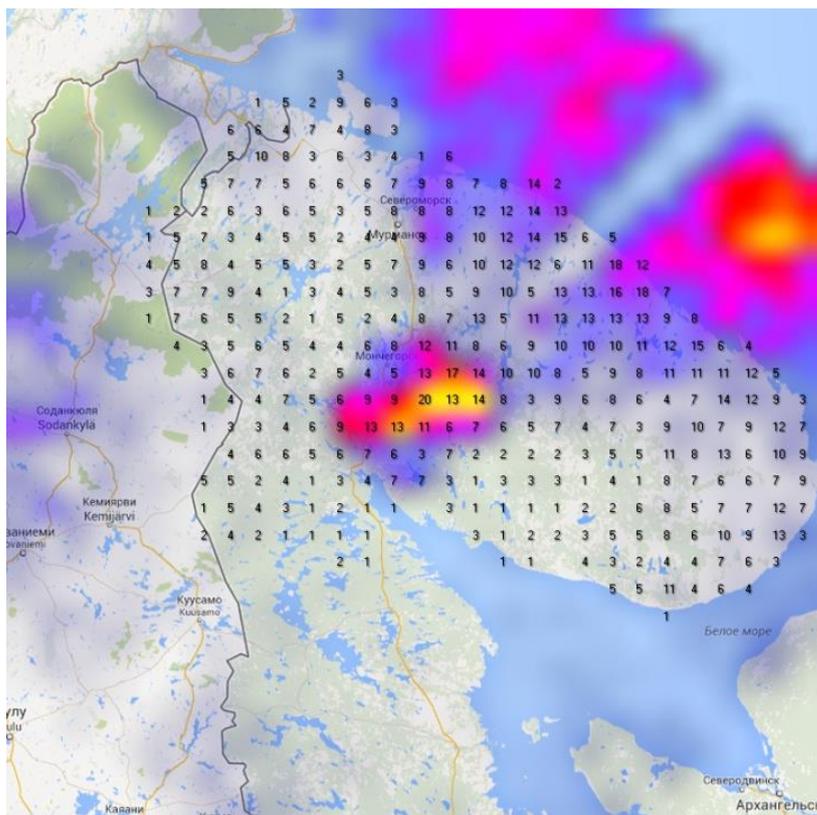


Рис.4. Территориальное распределение грозовых разрядов в 2013 г.

## Выводы

Регистрация грозовой деятельности в 2013-2014 гг. показала ярко выраженные очаги повышенной плотности разрядов молний на территории Кольского полуострова, прилегающих территорий и акватории. Выявлено значительное увеличение (в 2.7 раза) числа разрядов молний в 2014 г. по отношению к 2013 г.

Из-за ощутимой неоднородности распределения грозовых часов и плотности грозовых разрядов на землю по территории региона при проектировании молниезащитных мероприятий справедливо использовать полученные карты распределения плотности разрядов молнии на землю вместо устоявшегося применения общего числа грозовых часов по региону, описанных в ПУЭ и РД.

## Литература

1. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М., Сытина А. Н. Опыт регистрации грозовой активности на территории Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2 (17). С. 126-133.
2. Burtsev A. V., Nevretdinov Y. M. Lightning discharges distribution on the Kola Peninsula in 2013 // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on GIS AND REMOTE SENSING (November 17-19, 2014). Tsaghkadzor: Environmental Research and GIS Center, 2014. P. 93-98.

3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Изд. 7-е. РФ. СПб.: ДЕАН, 2007.
4. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений: РД 153-34.3-35.129-99. СПб.: ПЭИПК, 1999.
5. Горбатенко В. П., Ершова Т. В., Константинова Д. А. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над Западной Сибирью // Вестник ТГУ. 2009. № 329. С. 215-221.
6. Мониторинг опасных метеорологических явлений в Верхневолжском регионе / Ю. В. Шлюгаев, В. В. Клименко, Е. А. Мареев, А. А. Панютин, В. В. Соколов, М. В. Шаталова // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству 24-28 сентября: сб. тр. СПб., 2012. С. 133-135.
7. Davis C. J., Lo Kin-Hing. An enhancement of the ionospheric sporadic-E layer in response to negative polarity cloud-to-ground lightning // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35, L 05815, doi:10.1029/2007GL031909.
8. Бурцев А. В. Использование математического и логического аппарата для преобразования данных программы Astrogenic Nexstorm Lite для регистрации атмосферных электрических разрядов. Математические исследования в естественных науках // Труды IX Всероссийской научной школы (Апатиты, Геологический институт Кольского НЦ РАН, Кольское отделение РМО, 10-11 октября 2013 г.). Апатиты: К & М., 2013. С. 113-118.
9. Бурцев А. В. Разработка программного обеспечения и получение данных по грозовой активности для сопоставления с аварийными отключениями оборудования энергосистемы Мурманской области // XXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2014». Секция «Физика»: сб. тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2014. С. 78-79.
10. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М. Результаты регистрации грозовых разрядов на территории Кольского полуострова в 2014 году // Труды Кольского научного центра. Энергетика. Вып. 10. Апатиты, 2015. С. 65-71.
11. Rakov V. A. Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies // EGAT (Bangkok, Thailand November 7, 2012).

*Сведения об авторах*

**Бурцев Антон Владимирович,**

младший научный сотрудник лаборатории высоковольтной энергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, tonyburt@rambler.ru

**Невретдинов Юрий Масумович,**

к.тех.н., ведущий научный сотрудник лаборатории высоковольтной энергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, ymnnev@mail.ru

Д. А. Петрашова, Н. К. Белишева

### **ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В КЛЕТКАХ МЕРИСТЕМЫ *ALLIUM CEPA***

#### **Аннотация**

Показано, что при инкубации биологических объектов (*Allium cepa* L.) в специальной борированной камере с парафиновым покрытием, поглощающем нейтронную компоненту вторичных космических лучей (КЛ) с энергиями < 50 Мэв, в меристеме проростков выявляются специфические цитогенетические эффекты. Наблюдается снижение скорости пролиферации клеток, возрастание частоты встречаемости мостов в анафазе и телофазе, микроядер в клетке, а также появление агглютинации хромосом и двуядерных клеток.

#### **Ключевые слова:**

*нейтронная компонента космических лучей, нейтроны, экранирование, Allium-test, патологии митоза, микроядра, митотический индекс.*

D. A. Petrashova, N. K. Belisheva

### **THE CYTOGENETIC EFFECTS OF THE COSMIC RAYS HIGH-ENERGY NEUTRON COMPONENT IN THE *ALLIUM CEPA* MERISTEMATIC CELLS**

#### **Abstract**

We showed the specific cytogenetic effects in the *Allium cepa* meristem cells to be detected when incubating in the special borated paraffinic device absorbing of the cosmic rays neutron component with energy < 50 MeV. The cell proliferation speed decreasing, anaphase and telophase bridges frequency increasing, micronucleus frequency increasing, chromosome agglutination and binucleus cells appearance are observed.

#### **Key words:**

*cosmic rays neutron component, neutrons, shielding, Allium-test, mitosis pathology, micronucleus, mitotic index.*

#### **Введение**

Космические полеты, а также тщательно подготавливаемая миссия на Марс требуют знания о возможных последствиях воздействия высокоэнергетических частиц на организм космонавтов [1-3]. Представление о возможных эффектах заряженных частиц на биологические объекты были получены в результате космических [1, 3] и наземных экспериментов [4-6].

Вместе с тем, наземные эксперименты, в которых изучают эффекты моноэнергетических потоков тяжелых заряженных частиц [5] или тепловых нейтронов [7], не дают полного представления о возможных последствиях воздействия на организм космонавта потока солнечных космических или галактических космических лучей (СКЛ и ГКЛ соответственно), энергетический спектр и плотность потока которых варьируют в зависимости от характера солнечной активности (СА). Кроме того, на организм космонавта воздействуют вторичные компоненты КЛ, образующиеся в результате взаимодействия заряженных частиц с веществом корабля. Причем основной поток вторичных биоэффективных частиц внутри космического корабля представлен в основном нейтронами разных энергий [1, 2].

В силу того что в контролируемом эксперименте на ускорителях очень сложно получить потоки нейтронов с энергетическими спектрами, близкими к естественным фоновым воздействиям вторичных космических лучей (КЛ), генотоксичность вторичных нейтронов у поверхности практически не изучена. Только в отдельных исследованиях была показана биоэффективность нейтронной компоненты вторичных СКЛ у поверхности Земли в период солнечных протонных событий в октябре 1989 г. [6, 8], а также при фоновых вариациях ГКЛ [9].

С нашей точки зрения, именно наземные эксперименты по изучению биоэффективности нейтронной компоненты вторичных КЛ могут приблизить к пониманию того, какие последствия для организма космонавтов могут вызывать вторичные нейтроны в жизненном пространстве космического корабля. Особенно важно выявить эффекты полного спектра нейтронного потока и отдельных его спектральных составляющих, что позволит экранировать организм космонавта от наиболее биоэффективных компонент нейтронного спектра.

Для выявления вклада нейтронной компоненты с высокими энергиями (способных вступать в ядерные взаимодействия с веществом) в индукцию генетических нарушений у различных биологических объектов при фоновых вариациях КЛ, мы использовали специальную камеру, экранирующую биологические объекты от воздействия нейтронов с энергиями < 50 МэВ. Эта камера была создана сотрудниками Полярного геофизического института КНЦ РАН Ю. В. Балабиным и Е. А. Маурчевым, которые рассчитали параметры парафинового экрана на основе программы, позволяющей моделировать прохождение частиц через вещество [10-12]. Сравнение частоты и характера цитогенетических нарушений в исследуемых объектах при фоновом воздействии КЛ у поверхности Земли и в условиях экранирования позволит понять роль КЛ в функционировании биосистем и возможные эффекты КЛ в период космических миссий.

## **Материалы и методы**

Экспозиция биологических объектов к высокоэнергетической нейтронной компоненте вторичных КЛ проводилась в специальной конструкции (рис.1А), состоящей из парафина с борированной внутренней камерой для инкубации, маркированной стрелкой на рис.1Б. Толщина парафинового слоя рассчитана таким образом, чтобы все нейтроны с энергией до 50 МэВ поглощались экраном.

В качестве объекта исследования был выбран лук репчатый (*Allium cepa* L.), который рекомендован экспертами Всемирной организации здравоохранения как стандарт в цитогенетическом мониторинге окружающей среды. Цитогенетические нарушения в клетках этого объекта при тестировании степени генотоксичности воздействий хорошо коррелируют при сходных воздействиях с цитогенетическими нарушениями в клетках млекопитающих и человека [13, 14].

Эксперимент включал три этапа исследований. Первый этап – анализ динамики возможных нарушений митоза и ядерной структуры в клетках меристемы (20-25.04.2015). Второй этап – определение всхожести семян и интенсивности роста проростков (26.04-6.05.2015). Третий этап – оценка уровня возможных нарушений митоза и ядерной структуры в клетках меристемы

после недельной экспозиции в парафиновой камере. Этот этап являлся продолжением 2-го этапа.

Для исследований в рамках 1-го этапа семена *A. sera* помещали в чашки Петри на влажную фильтровальную бумагу и проращивали при температуре +24°C до появления корешков размером 0.2-0.5 см. Затем чашки Петри с семенами помещали в холодильник для синхронизации митотических циклов в проростках. После этого семена с одинаковыми по размеру проростками помещали в другие чашки Петри рядами по 10 семян. Всего было подготовлено таким образом шесть чашек, три из которых были помещены в парафиновую камеру, а три – в контейнер из папье-маше в качестве контроля. Для фиксации (5 фиксаций в опыте и контроле) отбирали по 10 корешков через каждые 18 ч в соответствии со стандартной методикой (это время соответствует периоду митотического цикла у *A. sera*).



Рис.1. Конструкция для инкубации биологических объектов в условиях воздействия высокоэнергетической нейтронной компоненты вторичных космических лучей

Для второго этапа исследований семена *A. sera* помещали в 6 чашек Петри (по 100 шт. на чашку), из которых три предназначались для инкубации в парафиновой камере, а три – в контейнере из папье-маше в качестве контроля. Ежедневно семена проверяли на прорастание. Когда появились первые проростки, их измеряли с использованием циркуля и линейки. Все данные вносили в таблицы.

После завершения замеров образцы корешков фиксировали по стандартной методике. Окрашивание корешков проводили 1 %-м ацетоорсеином при температуре 85 °С в термостате 15 мин, оставляли на сутки в свежем красителе при температуре 4 °С. Давленные препараты меристемы *A. sera* готовили в капле 45 %-й уксусной кислоты [15]. На препарате каждого корешка подсчитывали не менее 1000 клеток, учитывая все стадии митоза (интерфаза, профазы, метафаза, анафаза, телофаза), на основании чего вычисляли митотический индекс (МИ), а также оценивали все видимые нарушения митоза и ядерной структуры. Для каждой фиксации анализировали не менее трех препаратов.

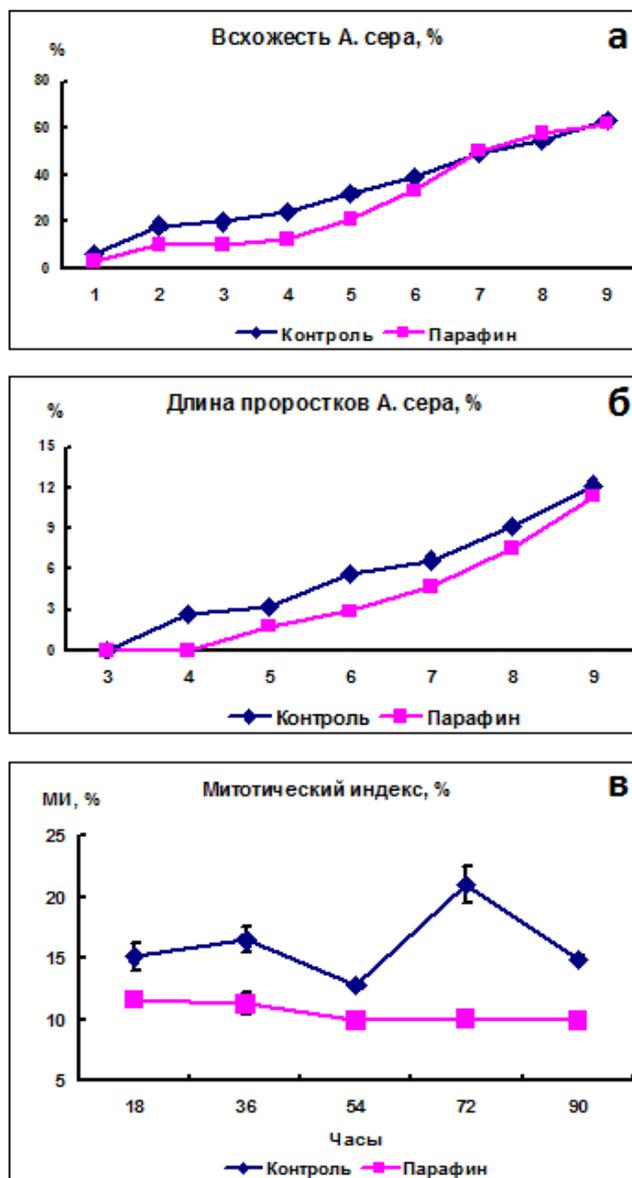


Рис.2. Показатели скорости пролиферации *A. cerealis* в экранированной камере (в условиях воздействия нейтронов с энергиями > 50 Мэв) и в контроле

### Результаты и обсуждение

Установлено, что всхожесть семян, длина проростков и митотический индекс в контроле был достоверно выше, чем в камере инкубации в условиях воздействия нейтронов с энергиями > 50 Мэв (рис.2).

При исследовании патологии митоза и ядра были выделены три условные группы нарушений: мосты в анафазе и телофазе, агглютинация хромосом и прочие патологии митоза (фрагменты хромосом в метафазе, отставание хромосом в анафазе и телофазе, моноцентрический и многополюсной митозы). Примеры патологий митоза приведены на рис.3.

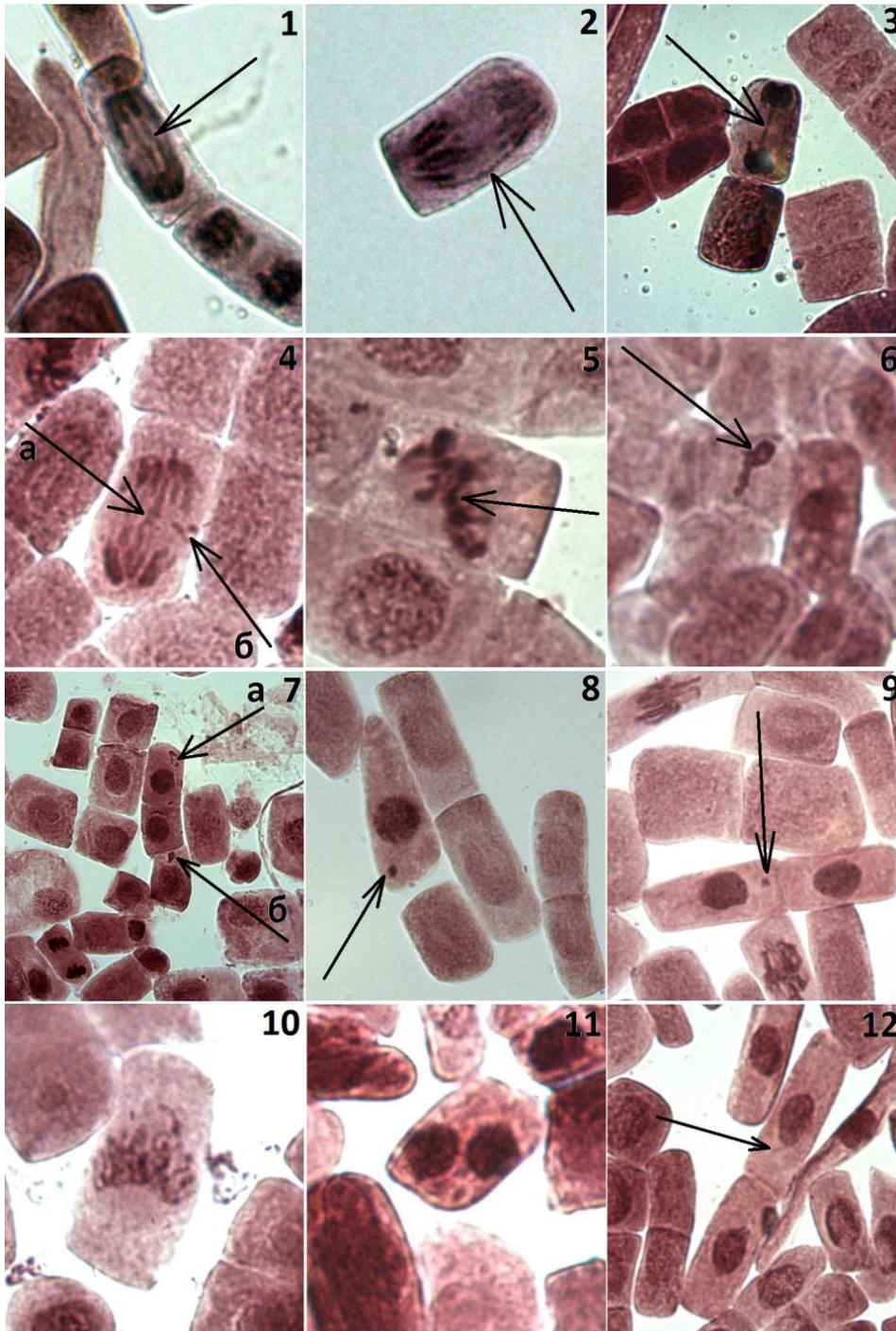


Рис.3. Патологии митоза в меристеме проростков *A. sera* при инкубации в парафиновой камере: 1, 2, 4а – мосты в анафазе; 3 – мост в телофазе; 5, 6 – агглютинация хромосом; 7б, 8, 9 – микроядра в клетке; 4б – отставание хромосомы в анафазе; 7а – хромосома в интерфазе; 10 – монополюсной митоз; 11 – двуядерная клетка; 12 – ядерная почка

Анализ препаратов показал, что число нарушений митоза в контроле не превышало 5 % от общего числа метафаз, анафаз и телофаз (МАТ), а при экранировании низкоэнергетической нейтронной компоненты – 12%. Из нарушений митотического деления клеток преобладали в обеих группах мосты в анафазе и телофазе, причем в корешках, проросших в парафиновой камере, эта патология встречалась чаще (рис.3, 4). Образование мостов может быть связано с наличием в кариотипе дицентрической хромосомы или со слипанием теломерных участков хромосом [16].

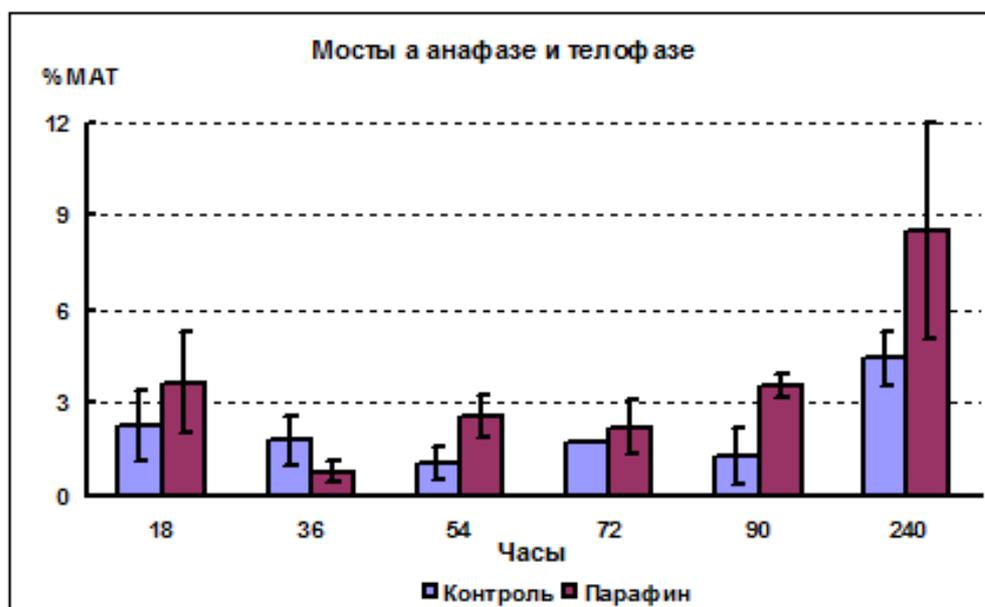


Рис.4. Доля нарушений митоза в виде мостов на стадии анафазы и телофазы в меристеме проростков *A. сера* при инкубации в парафиновой камере и в контроле

В корешках *A. сера* при инкубации в парафиновой камере, в отличие от контроля, встречается агглютинация хромосом. Эта патология возникает в результате слипания хроматина в метафазе или анафазе.

Основной по встречаемости патологией ядра являлось наличие в клетках микроядер (рис.3). Судя по графику на рис.5, динамика возникновения микроядер носит циклический характер, по-видимому, в контрольной группе период этого цикла более растянут. Однако данное предположение требует дополнительного изучения. В целом, наличие микроядер свидетельствует о значительном числе нерепарированных повреждений хромосомного материала, что ведет к цитогенетической нестабильности клеточных популяций [17].

При инкубации в парафиновой камере возникали нарушения, связанные с запаздыванием цитокинеза, такие как образования двуядерных клеток (рис.3). Двуядерные клетки образуются в результате нарушения процесса образования внутри родительской клетки клеточной перегородки – фрагмопласта [18]. В контрольной группе данная патология в текущем эксперименте не выявлена.

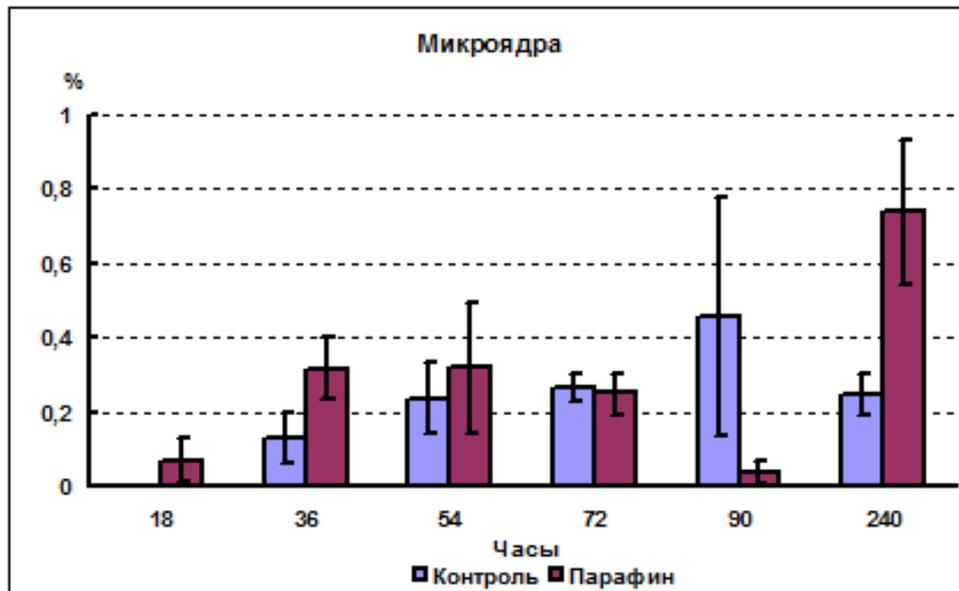


Рис.5. Доля клеток с микроядрами в меристеме проростков *A. sera* при инкубации в парафиновой камере и в контроле

### Заключение

Таким образом, при инкубации в парафиновой камере проростков *A. sera* в условиях воздействия высокоэнергетической нейтронной компоненты КЛ с энергиями  $> 50$  Мэв наблюдается снижение скорости пролиферации клеток, возрастает частота встречаемости мостов в анафазе и телофазе и микроядер в клетке, появляются такие патологии, как агглютинация хромосом и двуядерные клетки. Такие летальные для клетки патологии, как агглютинация, наряду с запаздыванием цитокинеза, могут быть специфическими показателями биоэффективности высокоэнергетической нейтронной компоненты КЛ. Однако чтобы подтвердить достоверность выявленных цитогенетических эффектов, необходимо повторить данный эксперимент еще в нескольких повторностях и желательно с привлечением дополнительных растительных тест-объектов, например, использовавшегося в других наших работах маша (*Vigna radiata*) [19].

В целом наши исследования могут внести свой вклад в понимание процессов взаимодействия вторичных заряженных частиц с генетическим материалом клетки во время космического полета и оценить дозу, приводящую к необратимым генетическим повреждениям.

### Литература

1. Акоев И. Г., Сакович В. А., Юров С. С. Биофизические основы действия космической радиации и ускорителей // Проблемы космической биологии. Л.: Наука, 1989. Т. 60. С. 232-248.
2. Space radiation measurements on board ISS THE DOSMAP EXPERIMENT / G. Reitz, R. Beaujean, E. Benton, S. Burmeister, Ts. Dachev, S. Deme, Luszik-M. Bhadra, P. Olko // Radiation Protection Dosimetry. 2005. Vol. 116, No. 1-4. P. 374-379.

3. Шафиркин А. В., Григорьев Ю. Г. Межпланетные и орбитальные космические полеты. Радиационный риск для космонавтов (радиобиологическое обоснование) / Гос. научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН; ФГУ «Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна». М.: Экономика, 2009. 639 с.
4. Goodhead D. T. Energy deposition stochastics and track structure: what about the target? // *Radiation Protection Dosimetry*. 2006. Vol. 122, No. 1-4. P. 3-15, doi:10.1093/rpd/ncl498.
5. Live cell microscopy analysis of radiation-induced DNA double-strand break motion / В. Jakob, J. Splinter, M. Durante, G. Taucher-Scholz // *PNAS*. 2009. Vol. 106, No. 9. P. 3172-3177.
6. The effect of cosmic rays on biological systems – an investigation during GLE events / N. K. Belisheva, H. Lammer, H. K. Biernat, E.V. Vashenyuk // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2012. 8. P. 7–17.
7. Relative biological effects of neutron mixed-beam irradiation for boron neutron capture therapy on cell survival and DNA double-strand breaks in cultured mammalian cells / К. Okumura, Y. Kinashi, Y. Kubota, E. Kitajima, R. Okayasu, K. Ono, S. Takanashi // *Journal of Radiation Research*. 2013. 54. P. 70-75.
8. Belisheva N. K. Biological effectiveness of cosmic rays near the Earth surface // *Космические факторы эволюции биосферы и геосферы: сб. статей Междисциплинарного коллоквиума (Москва, 21-23 мая 2014 г.)*. СПб.: Астрономическое общество, 2014. С. 187-202.
9. Связь динамики слияния клеток, растущих in vitro, с вариациями интенсивности нейтронов у поверхности земли / Н. К. Белишева, Б. М. Кужевский, Э. В. Вашенюк, В. К. Жиров // *ДАН*. 2005. Т. 402, № 6. С. 254-257.
10. Fine structure of neutron multiplicity on neutron monitors / Yu. V. Balabin, B. B. Gvozdevsk, E. A. Mauricev, E. V. Vashenyuk, D. D. Dzhappuev // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. 7. P. 283-286.
11. Transport of solar protons through the atmosphere during GLE / E. A. Mauricev, Yu. V. Balabin, E. V. Vashenyuk, B. B. Gvozdevsky // *J. Phys. Conf. Ser.* 2013. 409 012200, doi:10.1088/1742-6596/409/1/012200.
12. A new numerical model for investigating cosmic rays in the Earth's atmosphere / E. A. Mauricev, Yu. V. Balabin, B. B. Gvozdevsky, E. V. Vashenyuk // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015. Vol. 79, Issue 5. P. 657-659.
13. Barberrio A., Voltolini J. C., Mello M. L. S. Standardization of bulb and root sample sizes for the Allium test // *Ecotoxicology*. 2011. Vol. 20. P. 927-935.
14. Fiskesjo G. The Allium test as a standard in environmental monitoring // *Hereditas*. 1985. Vol. 102. P. 99-112.
15. Медведева М. Ю., Болсуновский А. Я., Зотина Т. А. Цитогенетические нарушения у водного растения *Elodea canadensis* в зоне техногенного загрязнения р. Енисей // *Сибирский экологический журнал*. 2014. № 4. С. 561-572.
16. Горячкина О. В., Сизых О. А. Цитогенетические реакции хвойных растений в антропогенно-нарушенных районах г. Красноярска и его районах // *Хвойные бореальной зоны*. 2012. XXX. № 1-2. С. 46-51.

17. Цитогенетические реакции семенного потомства на комбинированное антропогенное загрязнение в районе Новолипецкого металлургического комбината / О. С. Машкина, В. Н. Калаев, Л. С. Мурая, Е. С. Лепикова // Экологическая генетика. 2009. 8 (3). С. 17-29.
18. Малецкий С. И., Колодяжная Я. С. Генетическая изменчивость в популяциях соматических клеток и ее влияние на репродуктивные признаки у покрытосеменных растений // Успехи современной биологии. 1999. Т. 119, № 2. С. 128-143.
19. Петрашова Д. А., Белишева Н. К., Мельник Н. А. Оценка генотоксичности природного ионизирующего излучения в клетках *Vigna radiata* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 5(3). С. 829-831.

**Сведения об авторах**

**Петрашова Дина Александровна,**

к.биол.н., научный сотрудник Научного отдела медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, г. Апатиты, petrashova@admksk.apatity.ru

**Белишева Наталья Константиновна,**

д.биол.н., заведующий Научным отделом медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, г. Апатиты, natalybelisheva@mail.ru

УДК: 574.2: 57.04+551.590.21+579.24

Т. С. Завадская, Р. Е. Михайлов, Е. Н. Чеботарева, Н. К. Белишева

## **ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ МИКРОФЛОРЫ ЧЕЛОВЕКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ АГЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЗАПОЛЯРЬЯ**

### **Аннотация**

Приведен анализ данных по микрофлоре пациентов Апатитско-Кировского района за период с 2007 по 2013 гг. Выявлены наиболее часто встречаемые бактерии и рассмотрена их зависимость от гелиогеофизических агентов. Была выявлена тенденция заболеваний по гинекологии и органов дыхательной системы. Высказаны предположения о причине частоты встречаемости бактерий рода *Staphylococcus*.

### **Ключевые слова:**

*микрофлора, гелиогеофизические агенты.*

T. S. Zavadskaya, R. E. Mihajlov, E. N. Chebotareva, N. K. Belisheva

## **VARIATION OF THE MICROFLORA OF THE PERSON DEPENDING ON HELIOGEOPHYSICAL AGENTS UNDER THE CONDITIONS OF THE POLAR REGION**

### **Abstract**

The analysis of microflora of Apatite-Kirovsk region patients for the period from 2007 to 2013, is given. Most frequent types of bacteria have been revealed and their dependence on heliogeophysical agents has been examined. A trend for gynecology and respiratory system diseases has been determined. We named a number of reasons for the incidence of bacteria of the genus *Staphylococcus*.

### **Keywords:**

*microflora, heliogeophysical agents.*

### **Введение**

В суровых условиях Крайнего Севера переход от состояния здоровья к болезни бывает незаметен для самого человека, что сильно подрывает его иммунитет и состояние внутренней микрофлоры [1-4]. Влияние солнечной активности, космических лучей, атмосферного давления, солнечных бурь и магнитного поля Земли также оказывает сильное влияние на состояние биосферы, в частности на состояние жизнедеятельности человека и его микрофлоры [5]. Анализ на микрофлору человека является наиболее простым и информативным, для того чтобы провести оценку микробиологических последствий неблагоприятных факторов окружающей среды на человеческий организм.

Цель данного исследования состояла в анализе динамики микрофлоры человека и выявлении связи с вариациями гелиогеофизических агентов.

### **Материалы и методы**

Комплекс исследований включал бактериологические, анкетные, статистические методы. Мы проанализировали обращения населения в микробиологическую лабораторию для выявления зависимости роста бактерий в условиях Арктического региона.

Для анализа связи динамики микрофлоры с гелиофизическими агентами использовались параметры межпланетного магнитного поля (плазма солнечного ветра, индексы солнечной активности (СА) и геомагнитной активности (ГМА)

(<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>). Статистическая обработка результатов была выполнена с применением пакета программ Statistika 10.

Исследования проводились на базе микробиологической лаборатории городской больницы Апатитско-Кировского района. Исследуемый материал в стерильной пластиковой одноразовой таре доставляли в лабораторию на анализ.

## Результаты

За 5 лет (с ноября 2007 г. по февраль 2013 г.) для проведения лабораторных анализов обратились 9886 человек. За исследованный период было проведено 15269 анализов, наличие микроорганизмов было выявлено в 13065 образцах. Количество обращений женщин (7408) в 3 раза больше обращений мужчин (2326), 152 пациента не указали пол (анализ проводился анонимно). Среди мужчин наиболее многочисленной группой являются дети до 15 лет (587), что составляет четверть всех обращений. У женщин выделяются две группы 21-30 и 31-40 (1706 и 1098 обращений соответственно). В качестве исследуемого материала наиболее часто использовались цервикальная жидкость, моча, слизь из зева, мокрота (5948, 3649, 1850, 1377 образцов соответственно, табл.1). В результате лабораторного анализа определялись более сотни видов бактерий. Наиболее встречаемыми являются бактерии родов *Staphylococcus*, *Streptococcus* и *Gardnerella* (табл.1).

Таблица 1

Количество анализов по разным исследуемым материалам и встречаемость бактерий различных родов 2007-2013 гг.

Количество анализов		Встречаемость	
Исследуемый материал	Кол-во	Род бактерий	Кол-во
Цервикальная жидкость	5948	<i>Staphylococcus</i>	3016
Моча	3649	<i>Streptococcus</i>	1821
Слизь из зева	1850	<i>Gardnerella</i>	1188
Мокрота	1377	<i>Neisseria</i>	1083
Раневой отдел	1161	Дифтероиды	1015
Слизь из носа	722	Другое	4949
Другое	562	Не выявлено	2197
Всего	15269	Всего выявлено	13065

Рост и развитие стафилококковых инфекций могут быть связаны и с его высокой вирулентностью, и механизмом адаптации к практически любым условиям, а так же со снижением иммунитета у населения.

Стрептококковые инфекции, занимающие второе место, вызывают воспалительные процессы повсеместно: в зеве, носу, ушах, носоглотке, на коже. В тяжелых случаях могут привести к таким серьезным заболеваниям, как пневмония, сепсис [6].

Появление гарднереллы (наиболее часто встречаемая бактерия в анализах цервикальной жидкости) свидетельствует об общем снижении физического здоровья женского населения (стресс, гормональный сбой, простуда, половые инфекции и др.), развитии дисбиоза и вагиноза [6].

Исходя из данных в табл.2 можно предположить чувствительность грамположительных бактерий к большинству гелиогеокосмических агентов (планетарный индекс, количество солнечных вспышек, вариации магнитного поля, излучение солнца на радиоволнах). Возможно, это связано с их менее плотной клеточной стенкой. Отмечается большая чувствительность кокков к космическим показателям (СА, количество солнечных вспышек, излучение солнца на радиоволнах). А также отрицательная корреляция бактерий с показателем индекса напряжённости магнитного поля. Отдельно стоит выделить дрожжеподобный гриб Кандида, который имеет противоположный знак корреляции со всеми рассматриваемыми космическими показателями. Можно предположить, что это связано с его морфологической структурой и образом жизнедеятельности (другой тип питания, размножения).

Таблица 2

Корреляция месячных показателей солнечной активности с нормированной месячной встречаемостью бактерий

Показатель	+	-	Кокки	Бациллы	Коккобацилла	Candida
<i>Kp</i> index	0.30	0.22	0.22	0.22	0.12	-0.10
<i>R</i> (Sunspot No.)	0.58	0.24	0.58	0.40	-0.24	-0.11
<i>Dst</i> -index, <i>nT</i>	-0.19	-0.21	-0.14	-0.14	-0.18	0.05
<i>ap</i> _index, <i>nT</i>	0.31	0.22	0.27	0.21	0.07	-0.04
<i>f10.7</i> _index	0.56	0.26	0.56	0.37	-0.16	-0.09
<i>pc</i> -index	0.17	0.03	0.23	0.07	-0.18	-0.03

ПРИМЕЧАНИЕ: *Kp* index – планетарный (*p*) К-индекс, отклонение магнитного поля; *R* (Sunspot No.) – количество солнечных вспышек; *Dst*-index, *nT* – индекс напряженности магнитного поля; *ap*\_index, *nT* – индекс геомагнитной активности (вариации магнитного поля); *f10.7*\_index – излучение Солнца на радиоволнах; *pc*-index – индекс магнитной активности. Северный (N) на авиабазе Труле в Гренландии.

### Обсуждение результатов

В процессе исследования мы выявили, что наиболее встречаемыми в условиях Заполярья являются бактерии родов *Staphylococcus*, *Streptococcus* и *Gardnerella*. От гелиогеофизических агентов наиболее зависимы бактерии рода *Staphylococcus*, грамположительные бактерии. Среди остальных родов бактерий зависимости от космических агентов не прослеживается. Было выявлена тенденция заболеваний по гинекологии и органов дыхательной системы (исходя из количества исследуемого биоматериала).

Возможно, частота встречаемости бактерий рода *Staphylococcus* связана и с увеличением антибиотикотерапии. Стафилококк имеет мощную мембранную оболочку, состоящую из семи слоёв, что было показано методами электронной микроскопии. Это привело к образованию лекарственно-устойчивых штаммов стафилококка, которые легко приспосабливаются к неблагоприятным условиям среды и к физическим и химическим факторам, а также становятся более вирулентными и трудноизлечимыми, что часто приводит к хроническим формам заболевания [7].

## **Литература**

1. Троценко А. А., Журавлева Н. Г. Влияние экологических факторов на неспецифический иммунитет человека, проживающего в условиях Северо-Запада // Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 5. С. 851-857.
2. Белишева Н. К., Талыкова Л. В., Мельник Н. А. Вклад высокоширотных гелиогеофизических агентов в картину заболеваемости населения Мурманской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 1(8). С. 1831-1836.
3. Белишева Н. К. Прогноз функционального состояния организма человека на основе оценки «дозового» воздействия геокосмических агентов в высоких широтах // Человек в экстремальных условиях: здоровье, надёжность, реабилитация: мат-лы 5-го междунар. науч.-практич. конгр. М., 2006. С. 282-284.
4. Белишева Н. К. Глобальные и локальные аспекты воздействия космофизических агентов как экологически значимых факторов на физиологию человека // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине: сб. тр. 1-й междунар. науч.-практич. конф. (Санкт-Петербург, 23-26 ноября 2010 г.) / под ред. А. П. Кудинова, Б. П. Крылова. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. Т. 3. С. 42-47.
5. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 323 с.
6. Покровский В. И., Творогова М. Г., Шипулина Г. А. Лабораторная диагностика инфекционных болезней: справочник. М.: БИНОМ, 2013. 648 с.
7. Коротяев А. И., Бабичев С. А. Медицинская микробиология, иммунология и вирусология: учебник для медицинских вузов. СПб.: СпецЛит, 2008. 767 с.

## **Сведения об авторах**

### **Завадская Татьяна Сергеевна,**

лаборант Научного отдела медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, г. Апатиты, Green.myrtal@mail.ru

### **Михайлов Роман Егорович,**

младший научный сотрудник Научного отдела медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, г. Апатиты, rem1987@mail.ru

### **Чеботарева Елена Николаевна,**

руководитель лаборатории микробиологического анализа Апатитско-кировской центральной городской больницы, г. Кировск

### **Белишева Наталья Константиновна,**

д.биол.н., руководитель Научного отдела медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, г. Апатиты, natalybelisheva@mail.ru

УДК 57.045: 544.032.5: 53.098

**С. В. Муравьев, В. В. Цетлин, Н. К. Белишева**

### **СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ВОДЫ КАК ИНДИКАТОР ВАРИАЦИЙ КОСМО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ АГЕНТОВ**

#### **Аннотация**

Выявлено, что вода обладает сенсорными свойствами, которые выражаются в детектировании вариаций космо- и геофизической природы, в частности, связанных с солнечным затмением 20 марта 2015 г. Показана возможность использования ионометра с комбинированным редокс-электродом для оценки вариаций космо-геофизических агентов на основе регистрации окислительно-восстановительного потенциала воды и её температуры как параметров, характеризующих её состояние.

#### **Ключевые слова:**

*сенсорные свойства воды, космо-геофизические агенты, окислительно-восстановительный потенциал воды.*

**S. V. Muravev, V. V. Tsetlin, N. K. Belisheva**

### **WATER SENSORY PROPERTIES ARE THE INDICATOR OF SPACE AND GEOPHYSICAL AGENTS VARIATIONS**

#### **Abstract**

We have revealed that water possesses sensory properties. These properties are expressed in detecting variations of space and geophysical nature, in particular, connected with a solar eclipse on the 20th of March, 2015. We've shown the possibility of using ion meter with the combined redox electrode to assess the variations of space and geophysical agents on the basis of registration of oxidation-reduction potential of water and its temperature as parametres characterising water condition.

#### **Keywords:**

*sensory properties of water, space and geophysical agents, oxidation-reduction potential of water.*

#### **Введение**

Исследования последних лет показали, что свойства воды при различных методах детектирования постоянно меняются с различной периодичностью и отражают вариации космо- и геофизических агентов [1-4]. Динамика свойств воды совпадает с вариациями геомагнитного поля (ГМП), с плотностью первичных космических лучей (КЛ) на широте исследований [2], периодами колебаний оболочек Земли, земными и солнечными сутками, а также сезонными колебаниями [3, 4]. Более того, предварительные данные показали, что изменение свойств воды сопряжено с динамикой функционального состояния организма [5].

Экспериментальные данные, полученные при изучении характера связи между колебаниями свойств воды, вариациями космо- и геофизических агентов, физиологическими параметрами состояния организма человека, позволяют предположить, что вода является универсальным сенсором множественных физических воздействий, которые влияют также и на организм человека. Поэтому, изменение свойств воды могло бы служить индикатором биоэффективности физических агентов окружающей среды. Однако такое предположение требует дополнительного подтверждения, которое предполагает

дальнейшее проведение экспериментов по выявлению степени сопряженности вариаций космо- и геофизических агентов, динамики физиологических параметров с изменениями свойств воды.

Целью данной работы является выявление закономерностей изменения состояния воды в зависимости от флуктуаций воздействующих агентов геофизической природы. Оценка изменения состояния воды базируется на методе, позволяющем в непрерывном режиме регистрировать значения окислительно-восстановительного потенциала воды [3, 4].

### Материалы и методы

Оценка окислительно-восстановительного потенциала воды проводилась с применением ионометра И-160МИ. Окислительно-восстановительный потенциал регистрируется при помощи комбинированного платинового редокс-электрода ЭРП-105 (рис.1). Электрод помещён в стакан с дистиллированной водой, где имеется термодатчик (термопара) для контроля изменения



Рис.1. Комбинированный платиновый редокс-электрод

температуры и подключён к ионометру И-160МИ, который соединён с компьютером через RS-232-интерфейс для осуществления непрерывного сбора данных. Используемый ионометр фиксирует изменения окислительно-восстановительного потенциал (ОВП)  $Eh$ , который, как известно, является мерой химической активности элементов или их соединений в обратимых химических процессах, связанных с изменением заряда ионов в растворах. Другими

словами, ОВП, называемый также редокс-потенциалом ( $Eh$ ), характеризует степень активности электронов в окислительно-восстановительных реакциях, т. е. реакциях, связанных с присоединением или передачей электронов.

На компьютере установлена программа «Аналитика ИТ» для записи данных, которые записываются со скважностью 1 раз в минуту. Исследуемый объём жидкости с электродом помещён в термостат для предотвращения влияния температурных вариаций в помещении. Вода находится в стакане со специальной крышкой для предотвращения испарения. Стакан и электроды закреплены на универсальном штативе ШУ-05. Запись показаний термодатчика также производится 1 раз в минуту. Это необходимо для нахождения корреляций вариаций космо-геофизических агентов, ОВП и температуры жидкости, которая изменяется не смотря на наличие термостата. Согласно [3, 4], замеры силы тока через электрохимическую ячейку с чистой водой коррелируют с потенциалом на комбинированном редокс-электроде. Соответственно, флуктуации значений потенциала воды можно использовать в качестве характеристики свойств воды во времени, которые можно сопоставлять с вариациями космо-геофизических агентов.

## Результаты и обсуждение

Проведенные исследования за период 19-21 марта 2015 г. показали, что флуктуации свойств воды, оцененные по параметрам ОВП и температуры, ассоциированы с вариациями космо-геофизических агентов. Более того, оказалось, что свойства воды отражают такие глобальные космо-геофизические события, как солнечное затмение, произошедшее 20 марта 2015 г. в 13 ч 18 мин, когда солнце было закрыто на 87 %. Исследуя процессы, происходящие в воде в период до, во время и после солнечного затмения, мы получили временной ряд значений температуры исследуемой воды в стакане, ОВП воды, сравнили эти данные с вариациями нейтронного счета, детектируемого наземной станцией нейтронного монитора Полярного геофизического института КНЦ РАН, г. Апатиты. Корреляция между временными рядами значений параметров состояния воды, наземной скоростью счета нейтронного монитора, атмосферным давлением и скорректированными на атмосферное давление потоками космических лучей в околоземном пространстве на широте проведения экспериментов показала, что между свойствами воды (ОВП, температурой) и геофизическими параметрами существует значимая корреляция ( $p < 0.05$ ).

Сопряженность между показателями свойств воды и плотностью потоков космических лучей до, в период и после солнечного затмения (19-20 марта 2015 г., г. Апатиты) показана на рис.2.

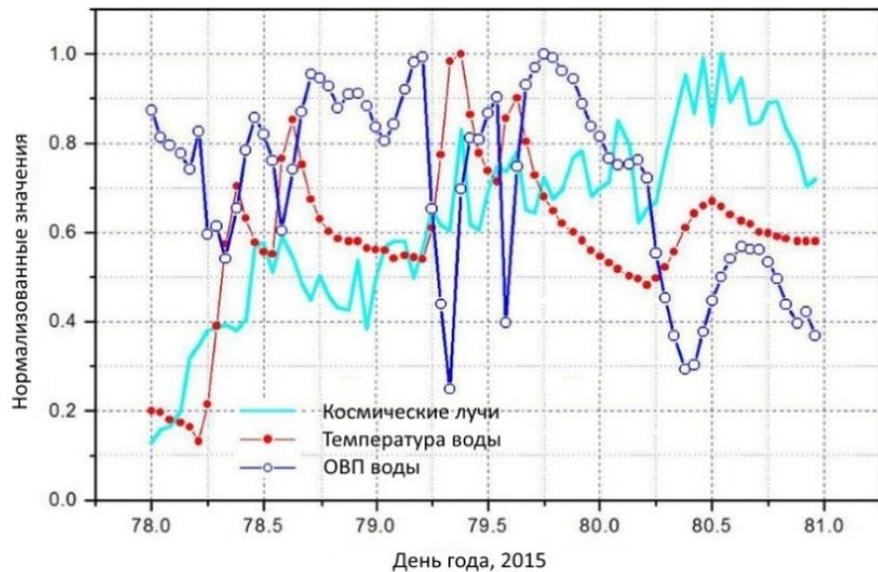


Рис.2. Сопоставление хода кривых значений ОВП, температуры воды и плотности космических лучей в околоземном пространстве на широте проведения экспериментов (нормированные значения)

Полученные данные свидетельствуют о том, что при возрастании интенсивности космических лучей (импульсов/сек на нейтронном мониторе) повышается температура воды при этом происходит снижение окислительно-восстановительного потенциала воды.

Было произведено сравнение наших данных по динамике ОВП за период с 19 по 20 марта 2015 г. (включающих период солнечного затмения) с аналогичными измерениями за тот же период времени, выполненными на широте и долготе Нарьян-Мара. Оказалось, что между вариациями ОВП на разных широтах и долготах в период солнечного затмения существует определенное подобие (рис.3). Это свидетельствует о глобальных космо- и геофизических эффектах, связанных с солнечным затмением, которые на поверхности Земли за этот период детектируются одновременно водой, находящейся в различных географических точках.

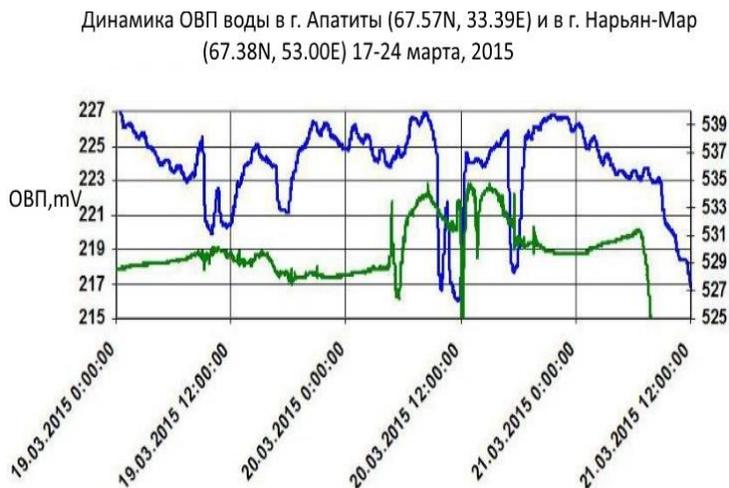


Рис.3. Динамика значений окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) воды в городах Апатиты и Нарьян-Мар

Таким образом, наши исследования показали, что вода обладает сенсорными свойствами, позволяющими детектировать космо- и геофизические воздействия, которые должны также отражаться и в физиологических эффектах на организме человека. Дальнейшие исследования позволят углубить знания о механизмах воздействия физических факторов среды на состояние воды и причинах сопряженности между свойствами воды, находящейся вне организма, и физиологическими изменениями в организме.

### Выводы

1. Состояние воды, регистрируемое с применением ионметра с редокс-электродом можно использовать как индикатор вариаций космо-геофизических агентов.
2. Такие параметры состояния воды как температура исследуемого объема воды и ОВП сопряжены с вариациями космических лучей и могут иметь различные знаки корреляции в зависимости от текущей геофизической ситуации.
3. Обнаружено соответствие между показателями ОВП в образцах воды, находящихся в различных географических точках, в период глобальных геофизических событий, обусловленных солнечным затмением.

## **Литература**

1. Винниченко М. Б., Белишева Н. К. Влияние потока нейтронов космического происхождения на свойства воды // Космическая экология и ноосфера: тез. Крымского межд. семинара (Партенит, 4-9 октября 1999 г.). Партенит, 1999. С. 76-77.
2. Винниченко М. Б., Белишева Н. К., Жиров В. К. Модуляция свойств воды вариациями космических лучей // ДАН. Науки о Земле. 2009. Т. 429, № 6. С. 816-820.
3. Цетлин В. В. Влияние солнечной активности и геосферных процессов на состояние воды как элемента эволюционного развития биосферы Земли // Живая Земля. 2012. № 72(4).
4. Цетлин В. В. Исследование реакции воды на вариации космофизических и геофизических факторов окружающего пространства // Метафизика. 2014. № 4, 14.
5. Sensory properties of water for detecting the affecting of the spaceflight environment on biological systems / V. Tsetlin, N. Belisheva, S. Muraviev, A. Martynova, S. Pryanichnikov // Abstracts IAA 2015 Human in Space symposium. (Czech Republic, Prague, June 29-July 3, 2015). Prague, 2015.

## ***Сведения об авторах***

### **Муравьев Сергей Владимирович,**

инженер Научного отдела медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, г. Апатиты, sss3mail@yahoo.com

### **Цетлин Владимир Владимирович,**

д.тех.н., заведующий лабораторией ФГБУН ГНЦ РФ  
Института медико-биологических проблем РАН, г. Москва, tsetlin@imbp.ru

### **Белишева Наталья Константиновна,**

д.биол.н., заведующий Научным отделом медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, г. Апатиты, natalybelisheva@mail.ru

**А. Г. Канатьев, О. И. Шумилов, Е. А. Касаткина, М. А. Мошникова**

## **ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ**

### **Аннотация**

Приведены результаты дендрохронологических исследований на Кольском полуострове. Описываются места сбора наиболее старых деревьев. Показаны методы обработки и стандартизации образцов. При исследовании обработанных древесно-кольцевых хронологий не обнаружено какого-либо значительного потепления климата в XX веке в данном регионе. Было показано, что главные минимумы солнечной активности ведут к значимым похолоданиям земного климата. Полученные результаты позволили выявить региональные особенности климатических вариаций на протяжении последнего тысячелетия и подтвердили возможность использования образцов можжевельника, лиственницы и сосны в дендрохронологических исследованиях для изучения климата.

### **Ключевые слова:**

*дендрохронология, места сбора образцов, обработка и стандартизация, длинные серии Кольского п-ова, солнечная активность, климат.*

**A. G. Kanatjev, O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, M. A. Moshnikova**

## **DENDROCHRONOLOGICAL INVESTIGATIONS AT THE THE KOLA PENINSULA**

### **Abstract**

The results of dendrochronological research on the Kola Peninsula are presented. We have described the gathering places of the oldest trees and discussed the methods of processing and standardization of samples. We did not detect any significant climate warming of the region in the twentieth century while investigating the collected tree-ring chronologies. It has been shown as well that the main minima in the past of solar activity lead to detectable coolings of the Earth climate. The results revealed the regional peculiarities of climatic variations over the past millennium, and confirmed the possibility of using samples of juniper, larch and pine trees in the dendrochronological studies for climatic analysis.

### **Keywords:**

*dendrochronology, sites of collecting, processing and standardization, a long series of the Kola Peninsula, solar activity, climate.*

### **Введение**

Деревья являются наиболее долгоживущими на земле организмами. На юго-западе США в Белых горах Калифорнии сейчас растут деревья возрастом более 4000 лет. Возраст отдельных особей может достигать почти 5000 лет. Недавно был найден новый рекордмен возрастом 5063 года. Это дерево относится к виду сосна остистая межгорная и также произрастает в Белых горах. С первого же дня рождения живое дерево является «очевидцем» многочисленных явлений природы и той среды, где оно произрастает. Годичное кольцо – это «память» природы, в которой хранятся с точностью до одного года оценки разнообразных климатических условий прошлого – осадки, температура воздуха, влажность почв, солнечная активность и даже удельная радиоактивность земной атмосферы. Значение дендрохронологии особенно возрастает сейчас, когда в науке стала преобладать тенденция динамического подхода к явлениям биосферы. Дендрохронология приносит в естественные

науки четвертое измерение – время. Годичные кольца деревьев, произраставших сто, тысячу и много тысяч лет тому назад являются «летописью природы», в них содержится огромная информация о прошлом Земли и Космоса.

### Места сбора дендрохронологических серий

Наша дендрохронологическая коллекция насчитывает более 120 серий хвойных деревьев (сосны, ели, лиственницы) и можжевельника, собранных на Кольском полуострове, в Финляндии и Санкт-Петербурге [1] (рис.1), в Ленинградской обл., на п-ове Таймыр и Сибири (в частности Хакасии).

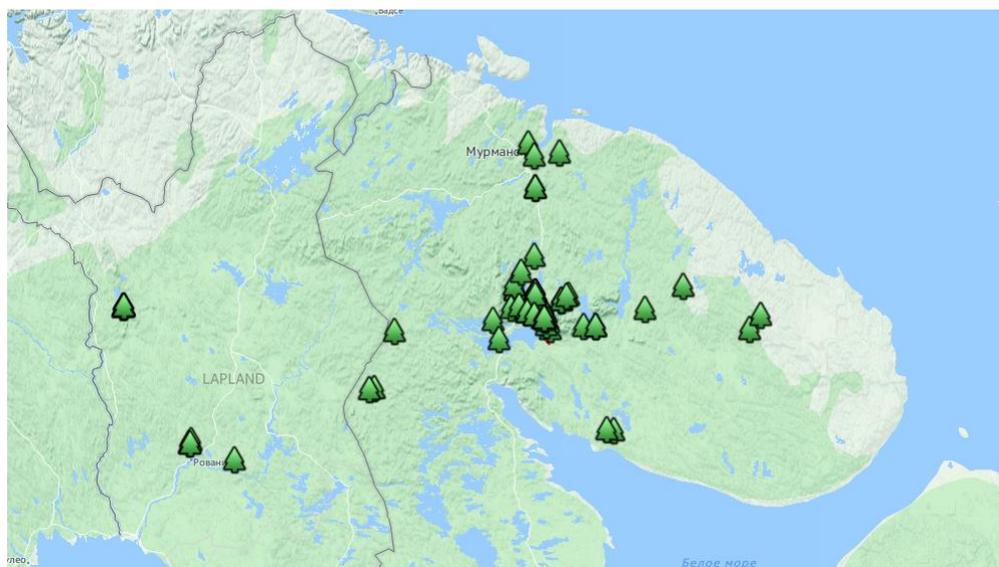


Рис.1. Места сбора дендрохронологических серий на Кольском полуострове и в Финляндии

Наиболее значимые серии были отобраны в трёх местах Кольского полуострова. Это Медвежий лог в Хибинских горах, Кэйвы и станция Лопарская. В 2003 г. в результате экспедиции по сбору образцов сосны в Медвежьем логе было обнаружено самое старое дерево для Хибинских гор возрастом в 448 лет. В 2010 г. была организована повторная экспедиция в Медвежий лог, в которой мы не смогли обнаружить более старые деревья, а сосна возрастом в 448 лет оказалась уже гнилой. Для проведения дендроклиматического анализа в 2004 г. в наиболее труднодоступной центральной части Кольского п-ова (р-н Кейвы: 67.5-67.9 N; 36.7-38 E) было отобрано несколько десятков образцов (в основном спилы) с живых и усохших деревьев можжевельника (рис.2). Найденные деревья представляют собой можжевельник сибирский (*Juniperus siberica* Burgsd) толщиной до 40 см и возрастом до 700 лет [2-5]. Также в 2005 г. нами была обнаружена самая старая сосна для Кольского полуострова возрастом более 560 лет. Образцы были отобраны вблизи северной границы леса в районе ст. Лопарская (68°37 N; 33°14 E, рис.3) [6, 7]. Последующая экспедиция на это же место, состоявшаяся в 2011 г., не смогла обнаружить более старые деревья, а самая старая сосна оказалась уже гнилой.

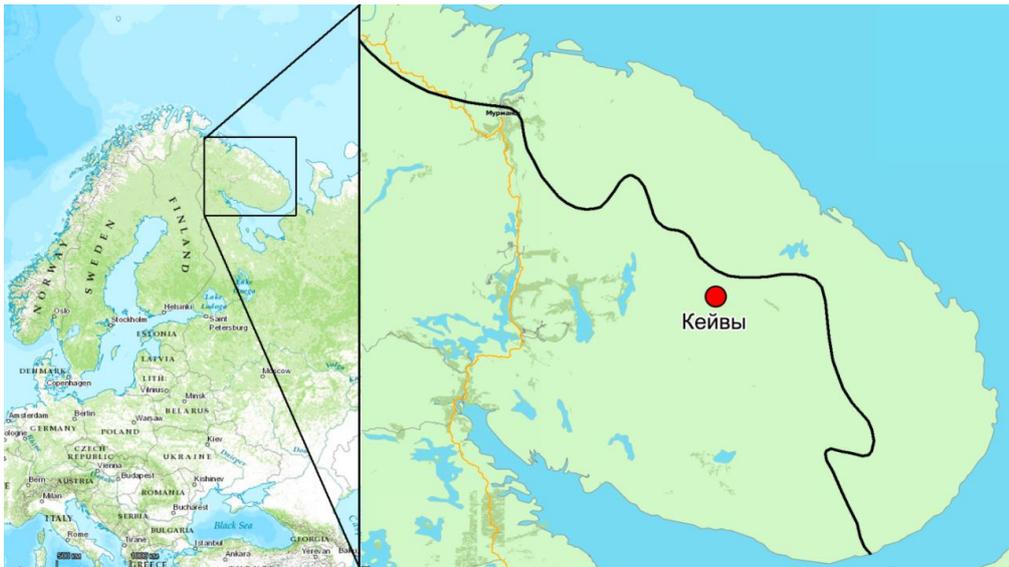


Рис.2. Карта района сбора образцов можжевельника

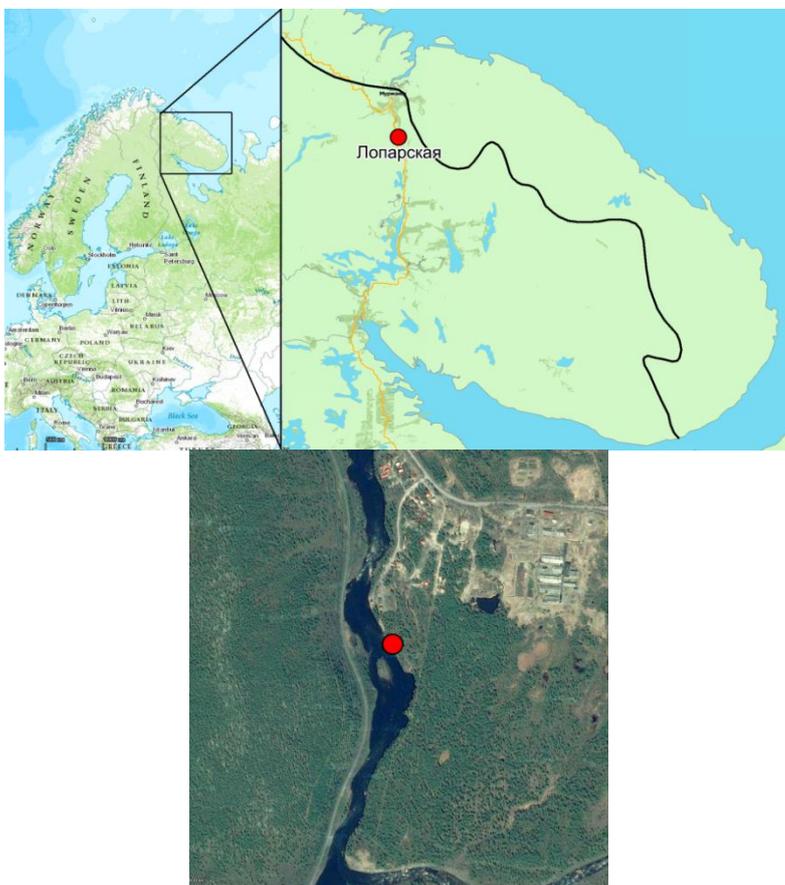


Рис.3. Местоположение пункта сбора образцов сосны относительно северной границы леса (слева) и на спутниковом снимке (справа). Станция Лопарская

### Обработка и стандартизация образцов

После сбора образцов проводится их дальнейшая обработка в соответствии с общепринятыми методическими требованиями древесно-кольцевого анализа [8]. В настоящее время для измерения ширины годичных колец широко используются специально сконструированные полуавтоматические комплексы, которые состоят из бинокулярного микроскопа сдвигающимся столиком либо планшетного сканера. Всё это управляется специальным программным обеспечением [9], которое может содержать практически все инструменты для анализа и построения древесно-кольцевых хронологий.

В дендроклиматологии потребность разделять влияние внешних климатических факторов на прирост деревьев и естественную внутреннюю изменчивость, присутствующую в дендрохронологических измерениях, привела к созданию специфических методов, названных стандартизацией. В основе стандартизации серий ширины годичных колец деревьев лежит тот факт, что при взрослении дерева и увеличении его размера ширина годичного кольца, как правило, уменьшается вдоль поперечного радиуса в основном из-за геометрического ограничения на добавление новых слоев древесины по увеличивающейся поверхности. В литературе был предложен целый ряд методов для удаления вариаций прироста. Большинство из этих методов предусматривает избавление от биологического тренда посредством подбора сглаживающей кривой к исходным измерениям ширины колец (рис.4) [10].

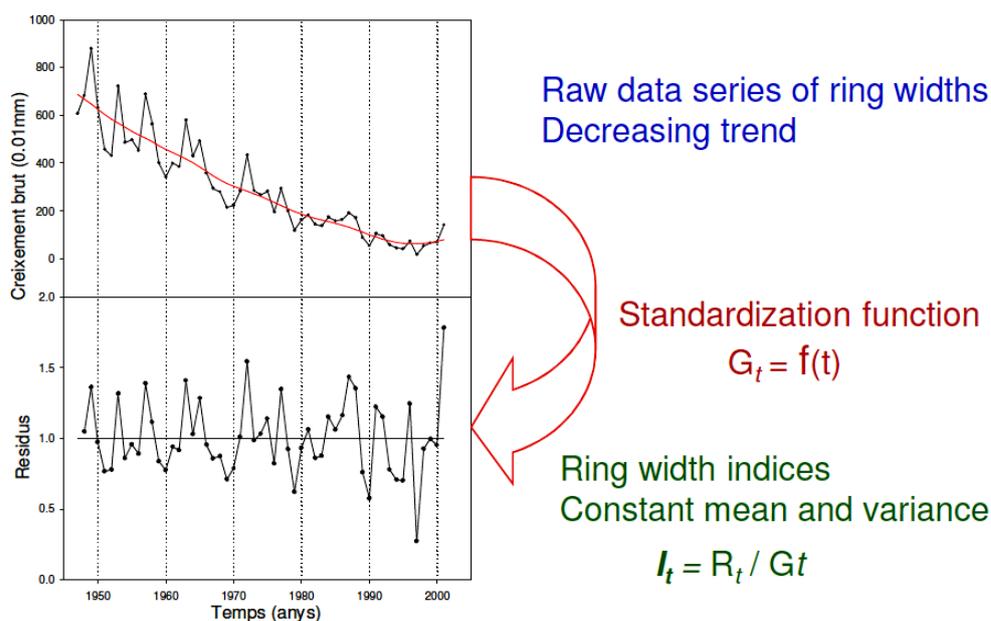


Рис.4. Принцип детрендинга – подбор сглаживающей кривой к исходным измерениям ширины колец

Наиболее распространенным методом сравнения и синхронизации кривых в дендрохронологии является наложение двух кривых одна на другую. Трудности синхронизации начинаются с того, что последовательность годовичных колец на разных срезах и даже разных радиусах одного среза ствола очень часто не совпадает друг с другом. Поэтому при синхронизации мы имеем дело не с поиском тождества, а установлением степени сходства, которая может лишь приближаться к 100 %. При этом имеет место общее правило: если два образца, каждый в отдельности, схожи с третьим, то они схожи и друг с другом. Существует большое количество разнообразных математических методов для количественной оценки степени сходства двух кривых или шкал. Работы М.И. Розанова показали, что высокие корреляционные связи получаются только между изменчивостью радиального прироста отдельных частей ствола одного дерева (коэффициент 0.88-0.97). Изменчивость же радиального прироста отдельных сучьев с радиальным приростом ствольной древесины, а также радиальный прирост стволов разных деревьев одного местопроизрастания характеризуется низкими коэффициентами корреляций, находящимися в пределах 0.6-0.7. Для стандартизации, детрендинга, кросс-датирования и построения обобщённых хронологий мы используем такие программы, как COFECHA [11] и ARSTAN (рис.5) [12].

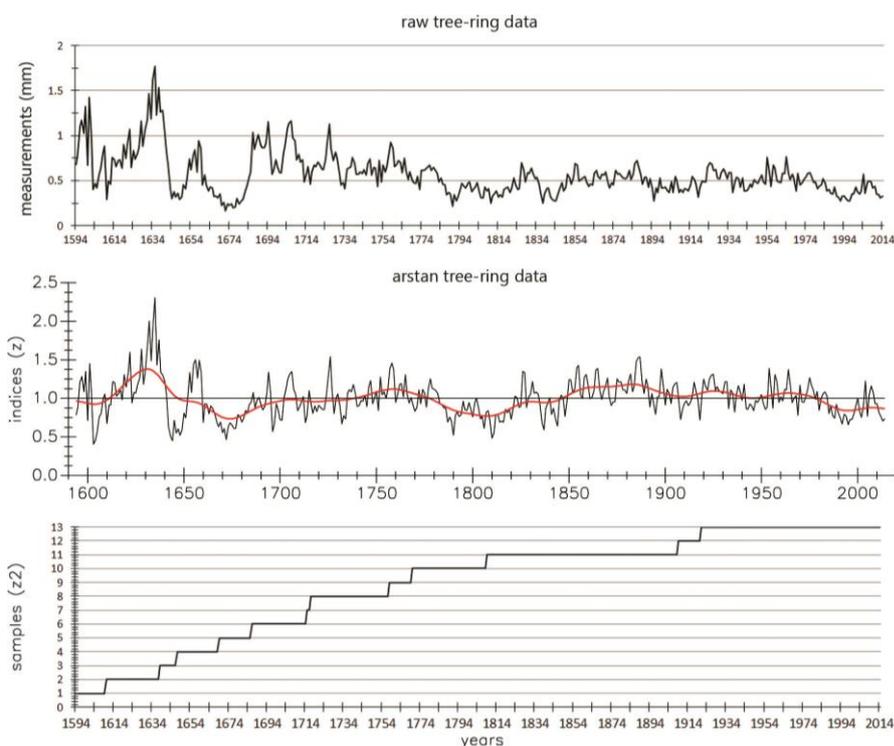


Рис.5. Результат работы программы ARSTAN для серии сосны. Кузрека (66.36.142 N; 34.47.854 E), 2014 г., Кольский полуостров.

Верхний график – обобщённая серия ширины колец деревьев без детрендинга образцов (сырые данные). График в середине – обобщённая серия после детрендинга. Нижний график – количество образцов и распределение их во времени

### Воздействие внешних (гелиогеофизических) факторов на климат Кольского п-ова по дендрохронологическим данным

В качестве примера связи климатических изменений по дендрохронологическим данным Кольского полуострова приводится график на рис.6. Отчётливо видно связь похолоданий климата с известными минимумами солнечной активности (Шпёрера (1450-1540), Маундера (1645-1715) и Дальтона (1790-1820)). Кроме того, прослеживается связь с интенсивными вулканическими извержениями. Наиболее значительное уменьшение годичного прироста (на 25 % по отношению к предыдущему году) имело место в 1601 г., что явилось следствием извержения вулкана Уайнапутина в Перу в феврале – марте 1600 г., самого мощного за последние 500 лет [13]. Аналогичное уменьшение ширины годичных колец в это время было зафиксировано у можжевельника на Кольском полуострове [4] и Полярном Урале [14].

Интересно отметить, что значительное уменьшение температуры во временном интервале 1780-1830 гг. совпало по времени не только с Дальтоновским минимумом солнечной активности, но также и с двумя мощными извержениями вулканов Лаки в 1783 г. (о. Исландия) и Тамбора в 1815 г. (Индонезия), которые привели к значительным социальным и климатическим эффектам.

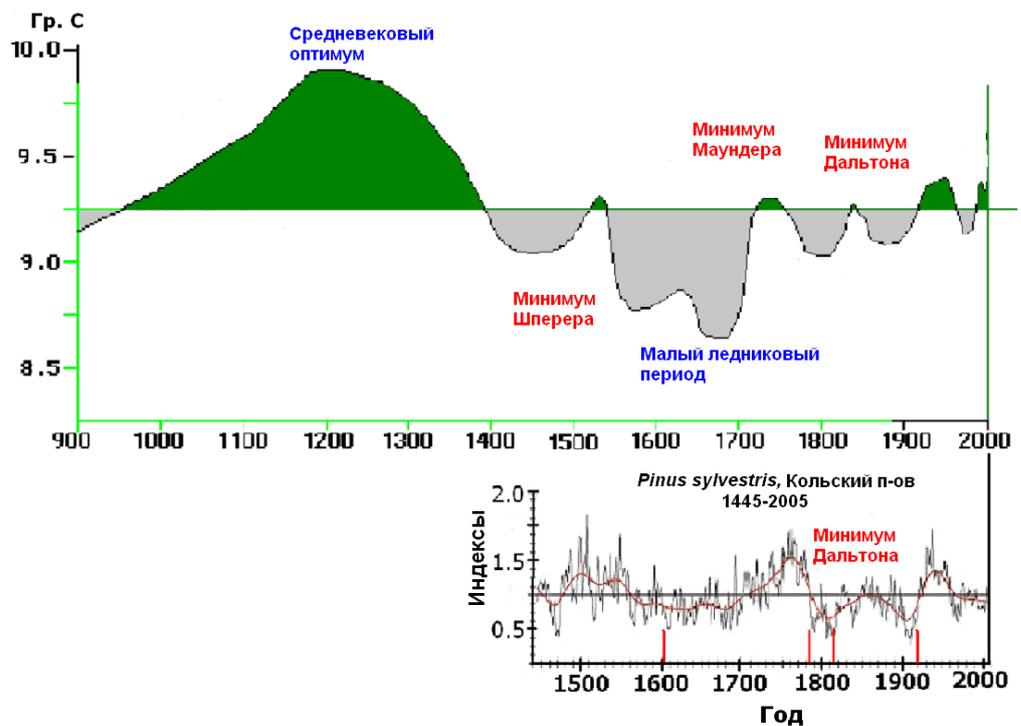


Рис.6. Вариации среднегодовой температуры в Европе за последнюю тысячу лет (вверху) и индексов годичного прироста сосны *Pinus sylvestris* на Кольском полуострове (1445-2005 гг.) (внизу). Вертикальными штрихами обозначены наиболее мощные вулканические извержения

Как известно, извержение вулкана Тамбора (вулканический эксплозивный индекс VEI=7) вызвало глобальное похолодание климата в северном полушарии в 1816 г., которое было зафиксировано по многим дендрохронологическим записям, включая Сибирь и Аляску [15]. При извержении вулкана Лаки (VEI=4) выброс вулканического вещества произошел в тропосферу, что ограничило его распространение в северном полушарии. Результатом этого извержения явились аномально жаркое лето 1783 г. и холодная зима 1784 г. [16]. До настоящего времени уменьшение древесного прироста в 1784 г., возможно, связанное с извержением вулкана Лаки, было зафиксировано на юге Норвегии [17] и Аляске [18]. В декабре 1902 г. в Исландии произошло крупное извержение вулкана Гримсвотн (VEI=4). Как видно из рис.6, в 1784 г. и в 1903 г. наблюдались значительные уменьшения древесного прироста по отношению к предыдущему году (на 14 и 41 % соответственно), которые, возможно, были вызваны похолоданиями, связанными с вулканическими извержениями в Исландии.

### **Заключение**

Наши дендрохронологические исследования позволяют сделать выводы, что древесно-кольцевые хронологии Кольского полуострова отражают климатические вариации, связанные с солнечной активностью и вулканическими извержениями [19]. При исследовании обработанных древесно-кольцевых хронологий не обнаружено какого-либо значительного потепления климата в XX веке в данном регионе, что подтверждается данными измерений и палеоклиматическими данными для некоторых районов Арктики. Полученные результаты позволили выявить региональные особенности климатических вариаций на протяжении последнего тысячелетия и подтвердили возможность использования образцов можжевельника, лиственницы и сосны в дендрохронологических исследованиях. Полученная хронология позволит сделать прогноз будущих климатических изменений с целью планирования хозяйственной деятельности на востоке Кольского полуострова и шельфе Баренцева моря. Из образцов можжевельника (включая реликтовые растения), собранных на Кольском полуострове, была создана 676-летняя древесно-кольцевая хронология [2-4]. Эта серия оказалась самой длинной серией можжевельника в северо-западном регионе России. Также получена самая длинная древесно-кольцевая хронология по сосне для Хибинских гор (448 лет) и хронология по сосне для Кольского полуострова (560 лет) [6, 7].

### **Литература**

1. Дендрохронологические исследования на Кольском полуострове / С. В. Иванов, А. Г. Канатъев, О. И. Шумилов, Е. А. Касаткина // Мат-лы 19-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных ВНКСФ-19 (28 марта – 4 апреля 2013 г.). Архангельск, 2013. С. 485.
2. Paleoclimatic potential of the Northernmost juniper trees in Europe / O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, N.-A. Morner, A. G. Kanatjev, I. Yu. Kirtsideli // Abstr. EURODENDRO Conference (28 September – 2 October 2005). Viterbo, 2005. P. 37.

3. Dendroclimatic potential of the oldest juniper trees at Kola Peninsula / O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, N. V. Lukina, I. Yu. Kirtsideli, A. G. Kanatjev // Abstr. of the 29-th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" (Apatity, 27 February – 1 March 2006). Apatity, 2006. P. 88.
4. Paleoclimatic potential of the northernmost juniper trees in Europe / O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, N. V. Lukina, I. Yu. Kirtsideli, A. G. Kanatjev // Dendrochronologia. 2007. Vol. 24. P. 123-130.
5. Использование можжевельника в дендрохронологическом анализе / О. И. Шумилов, Е. А. Касаткина, И. Ю. Кирцидели, А. Г. Канатьев // Лесоведение. 2008. № 1. С. 52-59.
6. Palaeoclimatic variations on the tree-ring data at Kola Peninsula (North-Western Russia) for 1455-2005 / O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, M. Krapiec, N. V. Lukina, A. G. Kanatjev, I. Yu. Kirtsideli // News of Forest History. 2008. Vol. 39. P. 64.
7. Paleoclimatic variations in the tree-ring data in the Kola Peninsula (Northwestern Russia) for 1445-2005 / O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, K. Mielikainen, M. Timonen, A. G. Kanatjev // International Journal of Environmental Research. 2011. 5(4). P. 855-864.
8. Software to analyze tree rings // The Science of Tree Rings: site. URL: <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm> (дата обращения: 29.09.2015).
9. Канатьев А. Г., Шумилов О. И., Касаткина Е. А. Программное обеспечение для дендрохронологических измерений // Приборы и техника эксперимента 2014. № 2. С. 127.
10. Cook E. R. A time series approach to tree-ring standardization: PhD Dissertation, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, 1985.
11. Holmes R. L. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin. 1983. Vol. 43. P. 69-78.
12. Cook E. R., Holmes R. L. Users Manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research. Tucson: University of Arizona, 1996.
13. de Silva S. L., Zielinski G. A. Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru // Nature. 1998. Vol. 393. P. 455-458.
14. Хантемиров Р. М., Горланова Л. А., Шиятов С. Г. Патологические структуры в годичных кольцах можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica* Burgsd.) и их использование для реконструкции экстремальных климатических событий // Экология. 2000. № 3. С. 185-192.
15. Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of Northern Siberia / G. Jacoby, N. V. Lovelius, O. I. Shumilov, O. M. Raspopov, J. M. Karbainov, D. C. Frank // Quaternary Research. 2000. Vol. 53. P. 312-318.
16. Palaeovolcanic forcing of short-term dendroisotopic depletion: The effect of decreased solar intensity on Irish oak / N. Ogle, C. S. M. Turney, R. M. Kalin, L. O'Donnel, C. J. Butler // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32. P. L04708.
17. Kalela-Brundin M. The narrowest ring of 1784 in tree ring series of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Southwest Norway – A possible result of volcanic eruptions in Iceland // Palaeoclimatic Research. 1996. Vol. 20. P. 107-118.
18. Jacoby G. C., Workman K. W., D'Arrigo R. D. Laki eruption of 1783, tree rings, and disaster for northwest Alaska Inuit // Quaternary Science Reviews. 1999. Vol. 18. P. 1365-1371.

19. Paleovolcanos, solar activity and pine tree-ring from the Kola Peninsula (Northwestern Russia) over the last 560 years / O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, K. Mielikainen, M. Timonen, A. G. Kanatjev // International Journal of Environmental Research. 2011. Vol. 5(4). P. 855-864.

*Сведения об авторах*

**Канатьев Александр Геннадьевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, kantjev@gmail.com

**Шумилов Олег Иванович,**

д.физ.-мат.н., главный научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, oleg@aprec.com

**Касаткина Елена Алексеевна,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, oleg@aprec.com

**Мошникова Мария Александровна,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, oleg@aprec.com

# РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД

УДК 537.877; 621.372.81.09; 621.3.029.42

**А. Е. Сидоренко, Е. Д. Терещенко, П. Е. Терещенко, В. Ф. Григорьев**

## **ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 Г. НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СНЧ-РАДИОВОЛН НА ВЫСОКОШИРОТНЫХ ТРАССАХ**

### **Аннотация**

Наблюдалось распространение искусственных радиоволн с частотой 82 Гц в волноводе Земля – ионосфера во время солнечного затмения на частично и полностью затененных трассах протяженностью 450-1200 км. Возбуждение контролировалось путем синхронных измерений поля вблизи передатчика, исключающих влияние ионосферы. Обнаружена вариация амплитуды поля в удаленных точках, близкая по времени к проходящему затмению. Особенности вариаций связаны также с динамикой угла возвышения Солнца. Предварительный анализ показывает, что изменения структуры нижней ионосферы во время затмения могут качественно сводиться к уменьшению эффективной высоты отражения СНЧ-волн. Наблюдаемые эффекты показывают реакцию распространяющегося поля на изменения структуры ионосферной стенки волновода и впервые наблюдались в этом частотном диапазоне во время солнечного затмения.

### **Ключевые слова:**

*солнечное затмение, распространение радиоволн, СНЧ, нижняя ионосфера.*

**A. E. Sidorenko, E. D. Tereshchenko, P. E. Tereshchenko, V. F. Grigoriev**

## **THE INFLUENCE OF THE SOLAR ECLIPSE OF 20 MARCH 2015 ON THE PROPAGATION OF ELF RADIO WAVES IN HIGH LATITUDES**

### **Abstract**

We present the results of observations of artificial ELF propagation during the solar eclipse over high-latitude paths with a length up to 1200 km. We found similar variations both in the field amplitude and in solar illumination. We associate this effect with the increase of ionospheric *D* layer height, as it was observed earlier in the VLF band. These observations provide new empirical data about the reaction of ELF waves on the short-term drastic change in the lower ionosphere.

### **Keywords:**

*solar eclipse, radio propagation, ELF, lower ionosphere.*

### **Введение**

Основные последствия резкого кратковременного уменьшения солнечного излучения в нижней ионосфере во время солнечного затмения связаны с падением скорости ионизации. Значительной модификации при этом подвергается нижний *D*-слой ионосферы [1], где в результате создаются условия, близкие к ночным. *D*-слой ионосферы в дневных условиях является областью, где происходит основное отражение радиоволн диапазонов СНЧ при

их распространении в волноводе Земля – ионосфера. Поэтому посредством наблюдений распространения СНЧ-волн во время солнечного затмения можно получать информацию об изменениях свойств *D*-области. Большое число таких работ за прошедшие годы было проведено в диапазоне ОНЧ с использованием естественных твик-атмосфериков, а также сигналов СДВ-радиостанций [2-7].

В СНЧ-диапазоне измерения во время солнечных затмений ранее не проводились, хотя известны немногочисленные работы с применением сигналов контролируемого источника на трассах большой протяженности (тысячи километров) при их пересечении линией солнечного терминатора [8, 9]. Представленные далее результаты измерений 20 марта 2015 г. расширяют эмпирические данные о воздействии затмения на нижнюю ионосферу и связанных с этим особенностей распространения радиоволн на область сверхнизких частот.

## Описание эксперимента

### *Аппаратура и география эксперимента*

Источник СНЧ-излучения располагался в северной части Кольского полуострова и представлял собой горизонтальный заземленный электрический диполь, ориентированный вдоль географической широты [8, 10]. Во время наблюдений генерировался СНЧ-сигнал с частотой 82 Гц при постоянной амплитуде тока в антенне.

Прием излучаемого сигнала производился одновременно в четырех точках (рис.1): Баренцбург, Ловозеро, Лехта и Петрозаводск. При этом обс. Ловозеро, удаленная от источника на расстояние порядка высоты ионосферы, использовалась для контроля условий возбуждения поля, поскольку СНЧ-поле на таком расстоянии практически не испытывает влияния ионосферы.

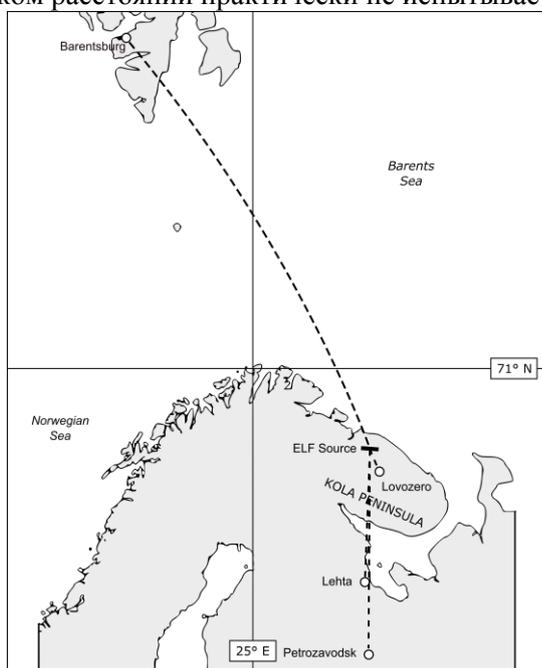


Рис. 1. Карта-схема эксперимента

Измерения выполнялись в течение трех дней – 19-21 марта 2015 г., для того чтобы, помимо наблюдения эффекта солнечного затмения, впоследствии сопоставить результаты с двумя контрольными случаями в невозмущенных условиях. Для анализа полученных данных были выбраны одинаковые промежутки времени 9-12 UT.

### Результаты измерений

#### *Контрольные измерения магнитного поля в obs. Ловозеро*

Для контроля условий возбуждения поля в волноводе Земля – ионосфера одновременно с измерениями в удаленных точках производились измерения магнитного поля вблизи источника – в obs. Ловозеро, где влиянием ионосферы еще можно пренебречь. Измерения показали, что за весь период наблюдений относительные вариации амплитуды генерируемого источником поля не превышали 1 %.

#### *Результаты измерений поля в удаленных точках*

На диаграмме (рис.2) показаны нормированные кривые вариаций амплитуды поля СНЧ-источника в пунктах Баренцбург, Лехта и Петрозаводск в период солнечного затмения 20 марта 2015 г. с 9 до 12 UT. Видно, что измеренные в удаленных точках амплитуды магнитного поля СНЧ-источника испытывают вариацию, по времени совпадающую с прохождением солнечного затмения в области измерений. Во всех пунктах устойчивое убывание амплитуды начинается в 9.30 UT, затем в промежутке 10.15-10.40 достигается минимум и начинается возрастание – примерно до 11.20 UT. Также обращает на себя внимание немонокотное поведение поля в промежутке 9.00-9.30, соответствующем начальной фазе затмения во всех пунктах наблюдений. При этом в obs. Баренцбург эта особенность наблюдается более явно.

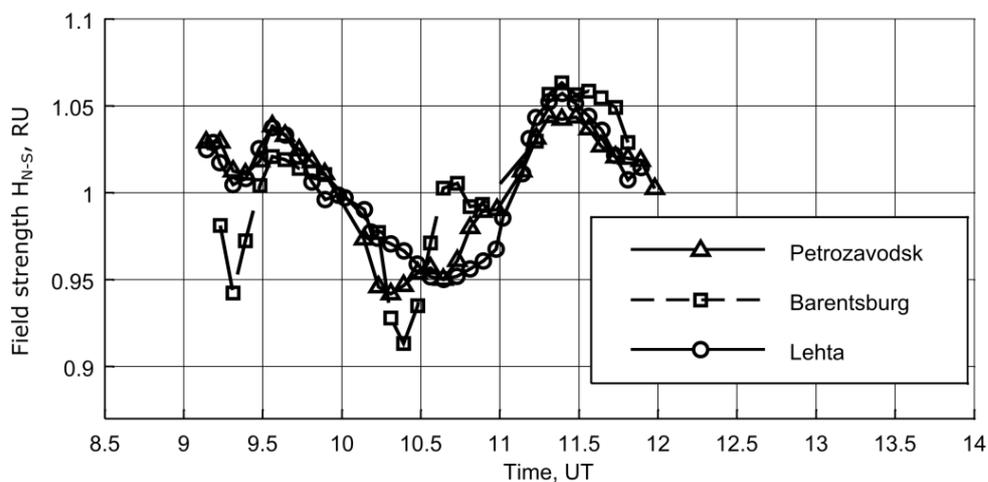


Рис.2. Амплитуда сигнала 20.03.15 в obs. Баренцбург (а), Лехта (б), Петрозаводск (в). Обозначения: маркеры – данные измерений; кривые – результат сглаживания

## Обсуждение результатов

Значительное уменьшение потока солнечного излучения во время затмения меняет концентрацию электронов в ионосферном слое  $D$  и нижней части слоя  $E$ , определяющих свойства волновода Земля – ионосфера в СНЧ-диапазоне. Резкое падение концентрации заряженных частиц вследствие уменьшения солнечной освещенности увеличивает действующую высоту отражающего ионосферного слоя, что наблюдалось, например, в исследованиях шумановского резонанса при смене дня и ночи [11].

Из известных формул для СНЧ-полей в волноводе Земля – ионосфера можно видеть, что увеличение высоты ионосферы приближенно обратно пропорционально уменьшает амплитуду компонент, что наблюдалось и в эксперименте. Минимумы амплитуды поля во всех пунктах наблюдались близко по времени к максимальной фазе затмения – в промежутке 10.10-10.35 UT.

Как видно на рис.2, сравнительно большое уменьшение амплитуды поля относительно начальной величины (на 9.30 UT) наблюдалось в Баренцбурге – 11-12 %, а в Лехте и Петрозаводске оно было практически одинаковым и составило 8-9 %. Кроме того, в поведении поля отчетливо видна зависимость от изменения угла возвышения за время измерений. В Петрозаводске и Лехте высота Солнца менялась очень мало, поскольку измерения практически совпали с местным астрономическим полуднем. В Баренцбурге Солнце поднялось на  $3^\circ$ , что при малых углах возвышения дает значимый эффект в освещенности и влияет на условия распространения СНЧ-волн.

## Заключение

Измерения в областях как частичного, так и полного затмения показали, что амплитуда поля источника во время затмения изменялась на 10 % практически синхронно с перекрытием Солнца Луной. Уменьшение солнечной радиации замедляет фотоионизацию в нижней ионосфере, меняя структуру волновода. Многочисленные предшествующие работы в СДВ-диапазоне показали, что это выражается главным образом в увеличении эффективной высоты отражения СНЧ-волн в  $D$ -области ионосферы. Результаты измерений в нашем эксперименте качественно подтверждают такой механизм. В дальнейшем целесообразно более детально рассмотреть изменение профиля концентрации электронов во время затмения на высотах области  $E$  и в верхней части  $D$ -слоя, где ионизация солнечной радиацией является преобладающей. Также во время наблюдения затмения в обл. Баренцбург было отмечено изменение амплитуды СНЧ-поля, связанное с увеличением угла возвышения Солнца. Полученные результаты отражают чувствительность радиоволн СНЧ-диапазона, распространяющихся в волноводе Земля – ионосфера, к состоянию ионосферы и ее изменениям при изменении условий освещенности Солнцем и показывают потенциальные преимущества использования контролируемых СНЧ-источников для мониторинга состояния ионосферы.

## Литература

1. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика: пер. с англ. Ч. 2. М.: Мир, 1975. 512 с.
2. Cray J. H., Schneible D. E. Effect of the eclipse of 20 July 1963 on VLF signals propagating over short paths // Radio Sci. 1965. 69D, No. 7. P. 947-957.

3. Total solar eclipse effects on VLF signals: Observations and modeling / M. Clilverd, C. J. Rodger, N. R. Thomson, J. Lichtenberger, P. Steinbach, P. Cannon, M. J. Angling // Radio Sci. 2001. Vol. 36, No. 4. P. 773-788.
4. Effects of a solar eclipse on the propagation of VLF-LF signals: Observations and results / B. K. De, S. S. De, B. Bandyopadhyay, P. Pal, R. Ali, S. Paul, P. K. Goswami // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2011 Vol. 22. P. 435-442, doi: 10.3319/TAO.2011.01.17.01(AA).
5. D-region ionosphere response to the total solar eclipse of 22 July 2009 deduced from ELF-VLF tweek observations in the Indian sector / R. Singh, B. Veenadhari, A. K. Maurya, M. B. Cohen, S. Kumar, R. Selvakumaran, P. Pant, A. K. Singh, U. S. Inan // J. Geophys. Res. 2011. 116, A10301, doi:10.1029/2011JA016641.
6. Spectral character of VLF sferics propagating inside the Earth-ionosphere waveguide during two recent solar eclipses / A. Guha, B. K. De, A. Choudhury, R. Roy // J. Geophys. Res. 2012. 117, A04305, doi:10.1029/2011JA017498.
7. Han F., Cummer S. A. Midlatitude daytime D region ionosphere variations measured from radio atmospheric // J. Geophys. Res. 2010. 115, A10314, doi:10.1029/2010JA015715.
8. Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Ханхараев А. В. Анализ условий распространения СНЧ-радиоволн на трассе "Зевс" – Забайкалье // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 12. С. 1017-1026.
9. Nickolaenko A. P. Diurnal pattern of ELF radio signal detected at the "Bellinshausen" Antarctic Station // Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies: The Sixth International Kharkov Symposium (25-30 June 2007). Vol. 2. P. 760-762.
10. Изменения фазы магнитного поля в СНЧ диапазоне на разломной тектонике / Е. Д. Терещенко, С. В. Полуянов, В. Ф. Григорьев, П. Е. Терещенко, А. Е. Сидоренко // Физика Земли. 2012. № 7. С. 1-7.
11. Williams E. R., Satori G. Solar radiation-induced changes in ionospheric height and the Schumann resonance waveguide on different timescales // Radio Sci. 2007. 42, RS2S11, doi:10.1029/2006RS003494.

***Сведения об авторах***

**Сидоренко Антон Евгеньевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Мурманск, anton@pgi.ru

**Терещенко Евгений Дмитриевич,**

д.физ.-мат.н., Полярный геофизический институт, г. Мурманск, evgteres@pgi.ru

**Терещенко Павел Евгеньевич,**

к.физ.-мат.н. Санкт-Петербургский филиал ФГБУН СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, tereshchenko@gmail.com

**Григорьев Валерий Федосеевич,**

Полярный геофизический институт, г. Мурманск, valgri@pgi.ru

**А. В. Ларченко, О. М. Лебедь, А. С. Никитенко, С. В. Пильгаев**

**ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 Г. В СИГНАЛАХ ОНЧ-ПЕРЕДАТЧИКОВ РСДН-20 ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИЙ ЛОВОЗЕРО И БАРЕНЦБУРГ**

**Аннотация**

Приведены результаты наземных измерений фаз сигналов ОНЧ-передатчиков радионавигационной системы РСДН-20 во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Регистрация сигналов проводилась в обсерваториях Полярного геофизического института (ПГИ) Ловозеро и Баренцбург. Показано, что во время прохождения полного затмения через трассы распространения сигналов наблюдается значимое понижение фаз этих сигналов в среднем на 0.3-0.4 рад.

**Ключевые слова:**

*солнечное затмение, распространение, ОНЧ-сигнал, фаза сигнала.*

**A. V. Larchenko, O. M. Lebed, A. S. Nikitenko, S. V. Pilgaev**

**EFFECTS OF SOLAR ECLIPSE OF MARCH 20 2015 IN VLF SIGNALS RSDN 20 BASED ON A DATA FROM LOVOZERO AND BARENTSBURG OBSERVATORIES**

**Abstract**

The results of ground-based observations of the phase variations of RSDN-20 radio navigation system VLF signals during the solar eclipse of March 20, 2015 are discussed. Signals recording held in Lovozero and Barentsburg PGI observatories. It has been shown that a significant reduction in the phase signal about 0.3-0.4 radians is observed when the total eclipse area crossed the signal propagation path.

**Key words:**

*solar eclipse, propagation, VLF signal, phase signal.*

**Введение**

Солнечное затмение представляет собой уникальное явление, позволяющее изучить влияние быстрого изменения интенсивности солнечного излучения на ионосферу Земли. При затмении Солнца отмечается уменьшение концентрации электронов в ионосфере, что приводит к увеличению эффективной высоты отражения радиоволн ОНЧ-диапазона [1].

Эффекты солнечного затмения изучаются довольно давно [2-5]. Результаты исследований показали, что во время солнечных затмений наблюдается нарушение суточных вариаций параметров распространения сигналов. Эффекты от солнечных затмений, зарегистрированные в амплитуде и фазе ОНЧ-радиосигналов, зависят от длины пути, частоты сигнала, времени суток и степени затемнения, поэтому каждое затмение является уникальным. В недавних работах [6, 7], посвященных солнечным затмениям 1 августа 2008 г. и 22 июня 2009 г., показано, что на распространение ОНЧ/НЧ-сигналов влияет прохождение лунной тени в момент затмения Солнца. Наиболее чувствительной к эффектам солнечных затмений характеристикой является фаза сигнала. Это связано с тем, что изменение эффективной высоты отражения ОНЧ-радиоволн приводит к изменению фазового пути волн данного диапазона при пересечении области затмения. Радиоволны на этих частотах отражаются от самых нижних слоев ионосферы и поэтому в меньшей степени подвержены затуханию

в ионосфере, однако их фаза очень чувствительна к высоте отражения. Таким образом, результаты экспериментальных исследований связанных с солнечными затмениями эффектов могут служить источником дополнительной информации о влиянии Солнца на параметры волновода Земля – ионосфера и поведение ионосферы.

Данная работа посвящена исследованию влияния полного солнечного затмения, произошедшего 20 марта 2015 г., на распространение ОНЧ-сигналов, регистрируемых в обсерваториях ПГИ Ловозеро и Баренцбург. Приводятся результаты измерения фаз сигналов передатчиков системы «Альфа».

### Аппаратура и постановка эксперимента

Работа основана на регистрации ОНЧ-сигналов (~ 12-15 кГц), принимаемых в обсерваториях Ловозеро и Баренцбург с помощью трехкомпонентного регистратора СНЧ/ОНЧ-полей на земной поверхности, разработанного в ПГИ. Технические характеристики регистратора отвечают современным требованиям к приборам, применяемым для изучения геофизических полей и физических механизмов распространения радиоволн. Кроме того, он обладает прецизионной привязкой ко времени, возможностью измерения вертикальной электрической компоненты поля СНЧ/ОНЧ-сигналов и обеспечивает широкий динамический диапазон [8]. Исследования проводились для сигналов передатчиков российской фазовой радионавигационной системы «Альфа» (также известной как радиотехническая система дальней навигации или РСДН-20) [9]. В настоящее время система «Альфа» включает три передатчика, работающих практически постоянно. Передатчики расположены в районе Новосибирска, Краснодара и Комсомольска-на-Амуре. Они излучают последовательности сигналов длительностью 3.6 с на частотах 11.905, 12.649 и 14.881 кГц. На рис.1 слева показано взаимное расположение приемников ОНЧ-излучения и перечисленных передатчиков. Справа приведена карта, иллюстрирующая область прохождения солнечного затмения 20 марта 2015 г. [10].

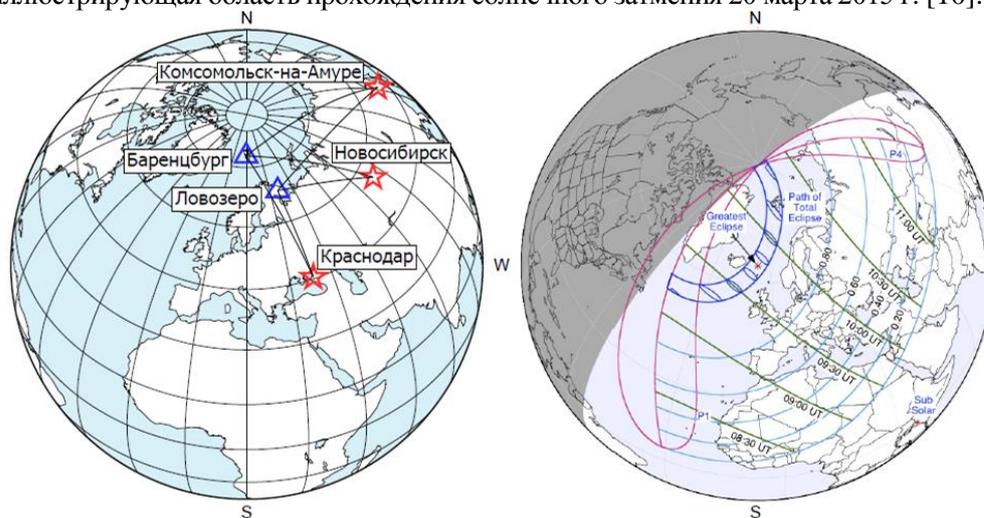


Рис.1. Расположение ОНЧ-приемников, передатчиков РСДН-20 и области прохождения затмения

Данное солнечное затмение представляло собой полное солнечное затмение 120-го сароса (период 18 лет 11.3 дня). Его можно было наблюдать на севере Атлантического океана и в Арктике. Частичные фазы затмения наблюдались в северной Африке, Европе, западной части России. Полное затмение можно было наблюдать между 9:14 и 10:18 UT. Особенностью данного эксперимента по исследованию эффектов влияния солнечного затмения на распространение ОНЧ-радиосигналов являлось то, что обс. Баренцбург, в которой велась регистрация сигналов, находилась практически на центральной линии затмения. Здесь полное затмение наступило в 10:09 UT и длилось 2.5 мин. Такое уникальное расположение ОНЧ-приемника позволило нам наблюдать эффекты влияния полного солнечного затмения на распространение ОНЧ-сигналов.

Стоит отметить, что анализ сигналов в период солнечного затмения был осложнен возмущенной геомагнитной обстановкой. Перед затмением, 18 марта, наблюдалась сильная магнитная буря. Значение *Dst*-индекса достигало примерно -230 нТл, а *Kp*-индекса – 7 [11]. Кроме того, 15 марта спутником GOES-15 была зарегистрирована вспышка на Солнце. Поток высокоэнергичных протонов наблюдался вплоть до 18 марта [12].

### Результаты эксперимента

Для исследования эффектов влияния солнечного затмения на распространение ОНЧ-сигналов мы измеряли фазу сигналов системы передатчиков «Альфа», регистрируемые в обсерваториях Ловозеро и Баренцбург. Результаты для всех трех передатчиков приведены на рис.2. Время максимального затемнения в обс. Баренцбург показано на рис.2 крестиком. Фазы, соответствующие частичному затмению, отмечены на рисунке сплошной линией. Остальные значения фазы обозначены штриховой линией.

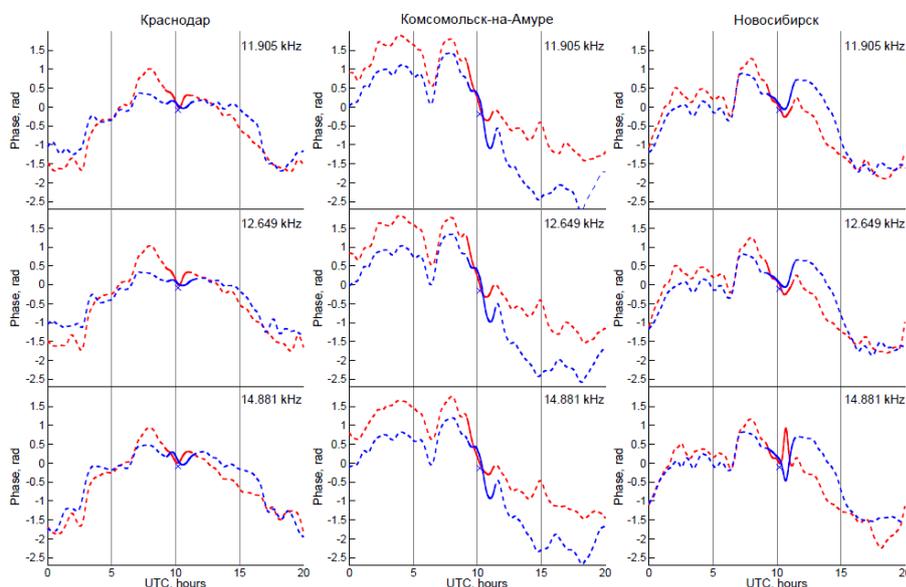


Рис.2. Фазы сигналов, зарегистрированных в обсерваториях Ловозеро (синий цвет) и Баренцбург (красный цвет). Слева направо: передатчики в Краснодаре, Комсомольске-на-Амуре и Новосибирске

Сначала рассмотрим поведение фазы сигнала с краснодарского передатчика (рис.2, левая панель). На всех трех передающихся частотах хорошо прослеживается суточный ход фазы. Переходы ночь-день и день-ночь достаточно резкие. Это, по-видимому, связано с тем, что трасса распространения сигнала располагается практически вдоль меридиана (рис.1). Кроме того, из рис.2 видно, что день в Баренцбурге немного короче дня в Ловозеро, что соответствует действительности в данное время года. Во время полного затемнения мы видим понижение фазы в Баренцбурге примерно на 0.4 рад. В обл. Ловозеро мы также наблюдаем понижение фазы, произошедшее чуть позже и на меньшее значение, примерно на 0.2 рад. Такое отличие можно объяснить расположением трасс распространения сигналов. Трасса Краснодар – Баренцбург захватывает область полного затмения, в то время как трасса Краснодар – Ловозеро проходит через область с максимумом в 84 % затемнения.

Теперь рассмотрим поведение фазы сигнала от передатчика в Комсомольске-на-Амуре (рис.2, средняя панель). Наблюдаемый здесь ее суточный ход сильно отличается от суточного хода фазы сигнала передатчика в Краснодаре, однако это отличие объясняется взаимным расположением трасс распространения сигналов (рис.1), они практически перпендикулярны друг другу. В сигнале от передатчика в Комсомольске-на-Амуре мы наблюдаем наибольший из всех трех передатчиков набег фазы (примерно 4.5 рад за 20 ч). Во время полного затмения здесь также уменьшилась фаза, примерно на 0.3 рад в Баренцбурге и на 0.5 рад в Ловозеро. Понижение фазы в Ловозеро, так же как и в предыдущем случае, наблюдалось немного позже.

Поведение фазы сигнала от передатчика в Новосибирске практически аналогично поведению фазы от краснодарского передатчика (рис.2, правая панель). Немного сдвинутый суточный ход фазы связан с расположением передатчика. Длина трасс распространения сигналов от этих двух передатчиков практически одинаковая, что обуславливает практически одинаковое значение набег фазы (3 рад за 20 ч). Здесь во время затмения фаза также уменьшается. Примерно на 0.3 рад как в Баренцбурге, так и в Ловозеро. Исключение составляет сигнал на частоте 14.881 кГц. Здесь наблюдается в Баренцбурге понижение фазы на 0.5 рад, а в Ловозеро увеличение фазы на 0.9 рад. Этот случай не объясняется простой моделью распространения ОНЧ-сигналов и требует дальнейшего более детального изучения.

### **Заключение**

Исследование влияния полного солнечного затмения, произошедшего 20 марта 2015 г., на распространение ОНЧ-сигналов, регистрируемых в обсерваториях Ловозеро и Баренцбург по результатам измерения фаз сигналов передатчиков системы «Альфа» показало наличие значимого понижения фаз сигналов во время прохождения полного затмения через трассы распространения этих сигналов. Было получено, что в среднем фаза снижалась на 0.3-0.4 рад на всех используемых частотах.

### **Литература**

1. Нестеров В. И. Изменение параметров принимаемых сигналов СДВ-диапазона во время солнечного затмения 31 июля 1981 г. // Вестник ТОГУ. 2012. № 3 (26). С. 49-56.

2. Total solar eclipse effects on VLF signals: Observations and modeling / M. A. Clilverd, C. J. Rodger, N. R. Thomson, J. Lichtenberger, P. Steinbach, P. Cannon, M. J. Angling // Radio Science. 2001. Vol. 36, Issue 4. P. 773-788.
  3. Crary J. H., Schneible D. E. Effect of the solar eclipse of 20 July 1963 on VLF signal propagating over short paths // Radio Sci. 1965. Vol. 69. P. 947-957.
  4. Kaufmann P., Schaal R. E. The effect of a total solar eclipse on a long path VLF transmission // J. Atmos. Terr. Phys. 1968. Vol. 30, № 3. P. 469-471.
  5. Reeve C. D., Rycroft M. J. The eclipsed lower ionosphere as investigated by natural very low frequency radio signal // J. Atmos. Terr. Phys. 1972. Vol. 34. P. 667-672.
  6. Effects of solar eclipse on long path VLF transmission / S. S. De, B. K. De, B. Bandyopadhyay, S. Paul, S. Barui, D. K. Haldar, M. Sanfui, T. K. Das, G. Chattopadhyay, P. Pa // Bulg. J. Phys. 2011. Vol. 38. P. 206-215.
  7. Одновременные наблюдения на Камчатке и в Якутии естественного электромагнитного излучения в КНЧ-ОНЧ диапазонах в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. / Г. И. Дружин, В. Н. Уваров, В. А. Муллаяров, В. И. Козлов, А. А. Корсаков // Геомагнетизм и аэрномия. 2010. Т. 50, № 2. С. 220-227.
  8. Трехкомпонентный СНЧ/ОНЧ-приемник с прецизионной привязкой к мировому времени / С. В. Пильгаев, А. В. Ларченко, М. В. Филатов, А. С. Никитенко, О. М. Лебедь. В настоящем сборнике.
  9. Jacobsen T. The Russian VLF navaid system, Alpha, RSDN-20 // Radio Waves below 22 kHz: site. URL: <http://www.vlf.it/alphatrand/alpha.htm> (дата обращения: 18.12.2015).
  10. Total Solar Eclipse of 2015 Mar 20 // NASA Eclipse: site. URL: <http://eclipse.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 18.12.2015).
  11. Godard space flight center: site. URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 18.12.2015).
- National centers for environmental information: site. URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov> (дата обращения: 18.12.2015).

#### ***Сведения об авторах***

##### **Ларченко Алексей Викторович,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, alexey.larchenko@gmail.com

##### **Лебедь Ольга Михайловна,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, olgamihsh@yandex.ru

##### **Никитенко Александр Сергеевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, alex.nikitenko91@gmail.com

##### **Пильгаев Сергей Васильевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, pilgaev@pgia.ru

УДК 550.388.2.:551.594.21

**В. И. Кириллов, А. А. Галахов, В. В. Пчелкин**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ НА ЧАСТОТНЫЕ СПЕКТРЫ АТМОСФЕРИКОВ**

### **Аннотация**

По данным, полученным на аппаратуре высокоширотной обсерватории Ловозеро, построены амплитудно-частотные характеристики атмосфериков во время солнечного затмения 20 марта 2015 г. Показано, что во время затмения не наблюдается изменений спектров атмосфериков, выходящих за пределы естественной девиации.

### **Ключевые слова:**

*атмосферик, солнечное затмение, ионосфера.*

**V. I. Kirillov, A. A. Galakhov, V. V. Pchelkin**

## **OBSERVATIONS OF VLF ATMOSPHERICS SPECTRA DURING THE SOLAR ECLIPSE**

### **Abstract**

Based on the data obtained by the instruments of the Lovozero high latitude observatory, the amplitude frequency characteristics of atmosphericics during the solar eclipse of March 20, 2015 have been defined. It has been shown that no significant changes (beyond the limits of natural deviation) in the spectra of atmosphericics were observed during the eclipse.

### **Keywords:**

*atmospheric, solar eclipse, ionosphere.*

### **Введение**

Д-слой ионосферы (высоты менее 90 км) характеризуется как непостоянством самого существования, так и сильной изменчивостью свойств в зависимости от многих факторов, прежде всего от интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового излучений Солнца [1-3]. Солнечное затмение – яркий пример масштабного явления, нарушающего регулярную суточную вариацию потока ионизирующего излучения, и, соответственно, резко меняющего параметры ионосферы [4]. В работе [5] были показаны статистически значимые изменения суточной вариации фазы СДВ-сигналов во время затмения 29 марта 2006 г. и показано, что изменения амплитуд регистрируемых сигналов находились в рамках среднесуточных отклонений.

Не лишенным оснований представляется предположение о том, что затмения, приводящие к существенным изменениям условий освещенности на трассах, идущих от мировых центров гроз к высокоширотным пунктам расположения приемников излучений, могут сложным образом менять и регистрируемые спектры атмосфериков. В этой связи нами было выполнено экспериментальное исследование вариаций спектральных кривых атмосфериков во время солнечного затмения 20 марта 2015 г.

### **Материал и методика исследований**

Экспериментальные данные, использованные в работе, были получены с помощью регистрирующей аппаратуры, установленной в высокоширотной

обс. Ловозеро (центральная часть Кольского полуострова). В комплект аппаратуры входили:

- антенна, выполненная в виде магнитной рамки и ориентированная в направлении запад-восток;
- приемник ОНЧ-диапазона;
- анализатор спектра, в котором сканирование по спектру происходит за счет последовательного во времени изменения параметров анализирующего фильтра (резонансная частота, добротность) и детектора (постоянная времени).

Данные записываются в бинарные файлы, содержащие время прихода импульсного сигнала, его амплитуду и номер частотного канала (всего 26 частот). Более подробно функциональная схема установки и её составные части описаны в работах [6, 7].

### Результаты и обсуждение

Затмение 20 марта 2015 г. длилось с 7:40 UT по 11:50 UT. Максимальная фаза затмения наблюдалась в 09.45 UT. В обс. Ловозеро (центральная часть Кольского полуострова) максимальная фаза составила 0.87 в 10:18 UT. Напомним, что в 9-10 UT наблюдается максимум активности азиатского грозового центра (АзГЦ).

Трасса распространения сигналов от АзГЦ до Кольского полуострова (~ 10 000 км), которая в обычных условиях в это время полностью освещена, оказалась частично затемненной, что и могло, в первую очередь, повлиять на форму спектральной кривой регистрируемых атмосфериков. В обсуждении следует отметить, что затмение происходило на третий день после солнечной вспышки, сопровождавшейся сильной магнитной бурей ( $\Sigma Kp = 48$ ) и Форбуш-понижением.

На рис.1а, б, в представлены спектры атмосфериков, полученные по данным регистрации во время затмения за три последовательных 20-минутных интервала времени (штриховая линия). Кроме того, на графиках для сравнения показаны средние спектры (усреднение проводилось за месяц за вычетом дней с геомагнитными возмущениями) с отмеченными среднеквадратичными отклонениями (вертикальные столбики), характеризующими естественную флуктуацию. Из рисунков видно, что во время солнечного затмения в спектрах сфериков не наблюдается существенных изменений, выходящих за пределы естественной девиации.

Отметим, что точный численный расчет ожидаемого эффекта выполнить затруднительно. Такой расчёт, кроме методической части, должен был бы включать в себя как конкретную экспериментальную информацию о распределении грозовой активности в глобальном масштабе с географической привязкой, так и информацию об условиях распространения (поглощении) вдоль трасс прохождения сигналов от мировых центров гроз на момент затмения.

На качественном уровне можно предположить, что инерционность механизмов ионизации не позволила проявиться изменениям условий освещенности в ходе затмения на трассе, существенная часть (~ 60%) которой во время затмения все же оставалась освещенной.

Следует отметить, что в конечной фазе затмения (с 11:00 до 11:20 UT) в диапазоне частот 5.5-7.0 кГц отмечается некоторое систематическое понижение полученной спектральной кривой по сравнению с усредненным

спектром. Зафиксированное экспериментально отклонение в этой части спектральной кривой также находится в пределах суточной флуктуации, однако систематичность понижения требует осторожности в суждении о случайности и дальнейшего изучения вопроса.

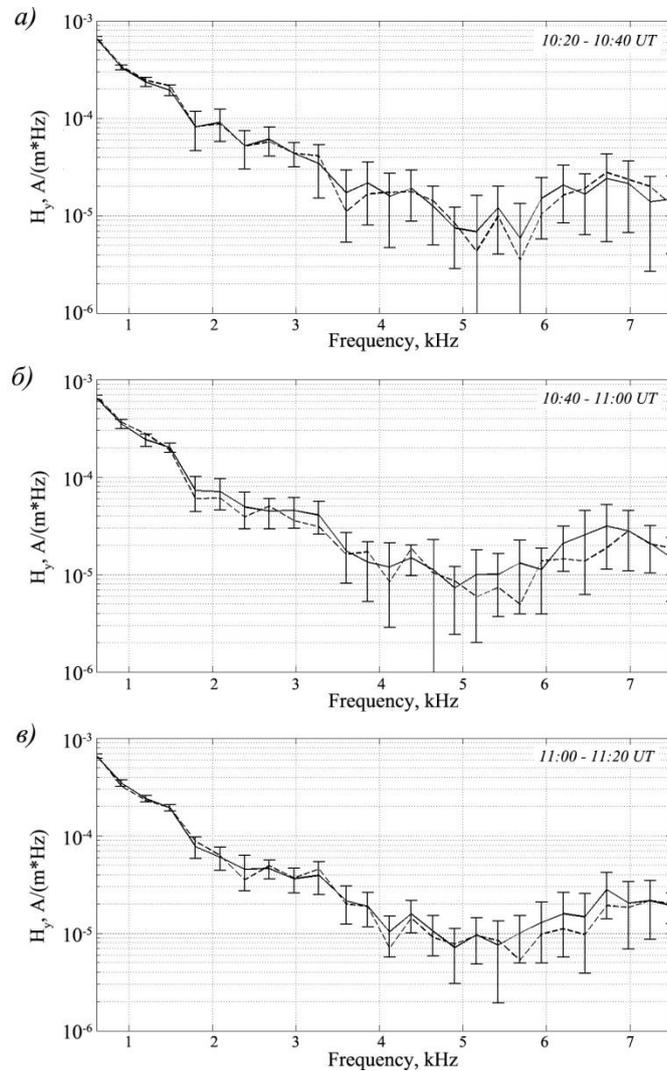


Рис.1. Средний спектр атмосфериков за три временных интервала: а – 10:20-10:40 UT; б – 10:40-11:00 UT; в – 11:00-11:20 UT. Сплошная линия – спектр сфериков, усредненный за месяц до затмения (вертикальные отрезки – разброс значений от среднего); штриховая линия – спектр атмосфериков в день затмения

### Выводы

Экспериментальные наблюдения спектров атмосфериков, проведенные в условиях Кольского полуострова во время солнечного затмения 20 марта 2015 г. в диапазоне частот 0.6-7.5 кГц, не выявили изменений, которые выходили бы

за пределы естественной девиации. Возможным объяснением этому факту может быть инерционность механизмов ионизации, не позволившая проявиться изменениям условий освещенности на трассе, существенная часть (~ 60 %) которой во время затмения оставалась освещенной.

Работа выполнена при поддержке Программы Отделения физических наук РАН «Фундаментальные проблемы электродинамики и волновой диагностики атмосферы».

### **Литература**

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 290 с.
3. Cummer S. A. Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics // Radio Science. 1998. Vol. 33, Iss 6. P. 1781-1792.
4. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. / Б. Б. Борисов, Д. А. Егоров, Р. Е. Егоров и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2000. Т. 40, № 3. С. 94-103.
5. Каримов Р. Р., Козлов В. И., Муллаяров В. А. Особенности вариации характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48, № 2. С. 250-254.
6. Галахов А. А., Ахметов О. И., Кириллов В. И. Аналоговый анализатор спектра атмосфериков КНЧ-ОНЧ-диапазонов на программируемых интегральных схемах // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 146-150.
7. Галахов А. А., Ахметов О. И. Комплекс аппаратуры для регистрации импульсной компоненты электромагнитного поля диапазона очень низкой частоты // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 136-142.

### ***Сведения об авторах***

#### **Кириллов Вячеслав Игоревич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, kirillov\_v@pgia.ru

#### **Пчелкин Владимир Викторович,**

к.физ.-мат.н., научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, pchelkin@pgia.ru

#### **Галахов Алексей Александрович,**

ведущий электроник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, galex@pgia.ru

УДК 550.3

**О. В. Золотов**

### **О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПОЛНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

#### **Аннотация**

Представлены результаты анализа методов и подходов, применяемых для определения аномальных возмущений в работах по сейсмо-ионосферной тематике. Сформулированы основные недостатки этих методов, затрудняющие анализ и интерпретацию данных, сопоставление результатов и их использование для построения комплексных методик прогноза сильных землетрясений.

#### **Ключевые слова:**

*ионосферные предвестники землетрясений, полное электронное содержание, GPS.*

**O. V. Zolotov**

### **ON SOME PROBLEMS TOWARDS DETECTION OF STRONG EARTHQUAKES PRECURSORS IN THE EARTH'S IONOSPHERE TOTAL ELECTRON CONTENT OBSERVATIONS**

#### **Abstract**

The paper presents the analysis' results of the methods applied for anomalies detection in a variety of seismo-ionosphere researches. Here we formulate principle problems on the way to interpret and cross-compare the results for complex strong earthquakes forecast system (method) design and implementation.

#### **Key words:**

*ionosphere precursors to earthquakes, total electron content, GPS.*

#### **Введение**

Исследования, направленные на построение надёжных методик прогнозирования сильных землетрясений (т. е. определения их места, времени и магнитуды) ведутся давно и к настоящему времени не имеют адекватного решения. Отсутствие такого решения привело к появлению междисциплинарных работ, в которых анализировались вариации параметров различных "оболочек" Земли, в том числе ионосферы. Доступность большого массива регулярно пополняемых данных полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы способствовала появлению работ, исследующих ПЭС в целях обнаружения ионосферных предвестников землетрясений. В результате сформировались две тенденции среди исследователей: сообщения об успешном обнаружении предвестников в ПЭС ионосферы Земли; сообщения об их отсутствии или принципиальной невозможности их существования.

#### **Проблемы на пути выявления аномальных возмущений**

Анализ имеющихся публикаций показал следующие проблемы. Работы, посвящённые поиску ионосферных предвестников землетрясений, в большинстве посвящены исследованию отдельных сильных событий. Очевидно, 2-3 или 15 событий явно не достаточно для получения статистически значимого результата. При этом работы, анализирующие достаточно большой набор землетрясений, редки. Приведём ссылки на такие работы (сокращение «ЗТ» при количестве событий здесь обозначает «землетрясение/землетрясений»): Zaslavski et al. [1] – рассмотрено

706 ЗТ; Liu et al. [2-6] – 14/20/184/150/82 ЗТ соответственно; Singh et al. [7], – 43 ЗТ; Le et al. [8] – 736 ЗТ. Очевидно, малое количество этих исследований связано с большой трудоёмкостью этой работы. Расчёт фоновой вариации, отклонений от неё и вычисление пороговых значений («аномальности» выброса) обычно автоматизированы. Автоматизированное определение предвестника реализовано в немногих работах и исключительно для одномерных данных, что не позволяет изучить пространственные свойства предвестника, которые являются существенными для задач их выявления. Таким образом, анализ и выявление характеристик (особенно пространственных размеров, времён жизни, привязки к окрестности эпицентра и т. п.) в основном выполняются вручную, путём визуального анализа.

В критических исследованиях сомнению, в основном, подвергаются итоговые результаты такого анализа (частотные характеристики появления ионосферных предвестников землетрясений, их заблаговременность, преимущественно время появления, время жизни, пространственные размеры и пр.), а сама «аномальность» выявленных перед сильными землетрясениями возмущений ПЭС в сейсмоактивных районах. Например, Masci [9] анализирует три частных случая из работы Kon et al. [10] и приходит к выводу, что указанные вариации, скорее всего, имеют своей причиной геомагнитные возмущения. К другим недостаткам Masci [9] также относит игнорирование в Kon et al. [10] ряда аналогичных (по амплитуде) возмущений.

Приведём основные недостатки используемых различными авторами методик определения «аномальности» предсейсмических возмущений ПЭС и в конечном счёте методик определения базовой спокойной (фоновой) вариации.

1. Некорректная обработка исходных данных. Kon et al. [10] увеличили число отсчётов по времени (шаг исходных данных – 2 ч, использованных для анализа – 1 ч) за счёт линейной интерполяции. Обоснование, какие преимущество это дало, не приводится. Отсутствие искажений в статистических свойствах полученной выборки по сравнению с исходной не проверено. Таким образом, массив отсчётов увеличен в два раза, что в лучшем случае приведёт к увеличению расхода машинного времени, а в худшем может привести связанные с процедурой или накоплением ошибок особенности, не присутствующие в исходных данных.

2. На свойства выборки накладываются некоторые ограничения, наиболее частое из которых – гауссов (нормальный) закон распределения величины. При этом выполнение этих ограничений для конкретных используемых выборок не проверяется и в лучшем случае заменяется некоторыми общими рассуждениями, поэтому применимость метода и полученные с его помощью результаты оказываются под вопросом. Отдельно отметим, что и «критики» возможности существования ионосферных ПЭС-предвестников также не проверяют применимость используемых методов статистики.

3. Определение фоновой вариации. Анализ исследований по сейсмо-ионосферной тематике показал, что не существует общепринятой методики определения фоновой вариации ПЭС ионосферы в целях выявления ПЭС-предвестников. Тем не менее можно выделить ряд наиболее часто используемых подходов: выбор ближайшего магнитоспокойного дня в качестве опорного; расчёт «скользящих» средних; использование результатов расчёта эмпирической справочной модели ионосферы IRI (International Reference Ionosphere); вейвлет-анализ; калмановская фильтрация; метод главных компонент; применение однослойных и многослойных искусственных нейронных сетей и некоторые другие.

Наиболее часто (и исторически первыми) в качестве фоновой вариации используются различные средние, вероятно, в силу простоты их реализации и невысоких требований к вычислительным ресурсам. При их расчёте коллективами авторов использовалось различное количество дней для определения спокойных значений (т. е. различная ширина окна «бегущего» («скользящего») среднего: 7, 14, 15, 27, 30 или 31 день. Обоснования выбора именно такого количества дней для расчёта невозмущенной вариации в статьях обычно не приводится, зависимость получаемой вариации от количества дней, использованных при её определении, не исследуется и не обсуждается.

4. Определение ПЭС-возмущений и критериев «аномальности» вариации. Эта проблема напрямую связана с обсуждавшимся выше вопросом определения фоновой вариации. Авторы обычно не исследуют зависимость морфологических свойств выявленных ПЭС-предвестников, например, от количества дней, учтённых в расчёте фоновой вариации. Эта проблема обозначена в работах [11] (см. рис.3) и [12] (см. рис.33-34) и требует дальнейших исследований.

Сами отклонения определяются как в абсолютных (TECu – Total Electron Content units,  $1 \text{ TECu} = 10^{16}$  электрон/м<sup>2</sup>), так и относительных (проценты, количество среднеквадратичных отклонений) единицах. При этом не исследуется вопрос зависимости выявленных особенностей от используемого подхода.

Определение в рассчитанных возмущениях аномальных значений требует задания количественного критерия «аномальности» данных. Обычно в качестве последнего задаётся некоторое фиксированное значение, например 50 %, или определяется по аналогии с доверительным интервалом. В этом случае аномальным считаются значения, выходящие за границы интервала  $M(X) \pm k \cdot \text{СКО}$ , где  $M(X)$  – выборочное среднее совокупности, используемой в вычислениях, СКО – среднеквадратическое отклонение,  $k$  – множитель, обычно принимающий значения 1, 1.5, 2, 2.5 или 3. При этом игнорируется тот факт, что при одном и том же  $k$ , но разных расчётах фоновой вариации, будут получены разные ПЭС-предвестники – разной амплитуды и линейных размеров. Наглядно это проиллюстрировано на рис.34 работы [12]. Вопрос необходимости калибровки используемых методов определения порога «аномальности» данных многими авторами игнорируется.

Таким образом, из-за различий в способе вычислений фона, «аномальных» возмущений, величины порога для определения «аномальности» данных становится проблематично совместно анализировать работы различных авторов и полученные в них численные характеристики линейных размеров, амплитуд и характерного времени проявления ПЭС-вариаций, предшествующих сильным землетрясениям.

5. Множество работ анализирует одномерные точечные данные. Даже те работы, которые исследуют карты ПЭС, рассматривают их как совокупность независимых одномерных временных рядов. Такое рассмотрение не позволяет исследовать существенные особенности ПЭС-аномалий, связанные с их линейными размерами и размещением в пространстве. Те же работы, которые учитывают совместные вариации в нескольких точках, тоже имеют ряд ограничений: например, требуют, чтобы GPS-приёмники располагались на одной и той же или очень близкой геомагнитной широте, а долгота не различалась слишком сильно.

6. Не учитывается геомагнитная активность. В большинстве работ «учёт» геомагнитных возмущений осуществляется путём исключения возмущённых дней из рассмотрения. Из немногих работ, которые это делают, можно отметить [13].

He et al. [14] с помощью вейвлет-преобразований (в русскоязычной литературе вместо термина «вейвлет» иногда используется термин «всплеск») исключил из вариаций ПЭС ионосферы, предшествующих M9.0 землетрясению, составляющую, определяемую изменениями солнечной активности. Тем не менее в работе [14] не обосновывается выбранный базис вейвлет-разложения, его применимость для разных гелио-геомагнитных условий, а также не проведено исследование зависимости получаемых результатов от выбранного базиса, например широко распространённых вейвлет Хоара, вейвлет Гаусса, вейвлет Добеши, «Мексиканская шляпа» и пр. Приведён пример использования этого метода только для одного события; ничего не известно об успешном применении метода для обработки большой выборки событий.

7. Не учитываются данные об оценках СКО используемого набора данных. NASA вместе с глобальными картами ПЭС ионосферы поставляет для них же глобальные карты СКО. Ни одна известная нам работа, которая анализирует эти данные, сведения о СКО не использует. Исследователи, которые восстанавливают ПЭС самостоятельно, не приводят соответствующих оценок СКО для своих данных. Таким образом, не удаётся оценить, как полученные значения соотносятся с величиной СКО.

## **Выводы**

Приведённый выше анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Не существует общепринятой универсальной методики определения аномальных возмущений полного электронного содержания ионосферы в приложении к задачам поиска ионосферных предвестников землетрясения.

2. Различия в реализациях применяемых исследователями методик затрудняют их взаимное сопоставление, а также проверку корректности получаемых результатов.

3. Ряд методик (основанных на нейронных сетях, разложениях в вейвлет-базисах и пр.) не позволяет связать с получаемыми значениями физический смысл (физическую интерпретацию получаемых величин), что уводит проблему из ряда физических задач в статистические (классификация и распознавание «образа» предвестника в данных произвольной природы) или задачи машинного обучения. Тем самым отсекаются физические критерии «разумности» получаемого решения.

Таким образом, решение перечисленных выше проблем является необходимым условием для обеспечения достоверности и надёжности определения ПЭС-предвестников.

## **Литература**

1. Zaslavski Y., Parrot M., Blanc E. Analysis of TEC measurements above active seismic regions // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1998. Vol. 105. P. 219-228, doi:10.1016/S0031-9201(97)00093-9.
2. Seismo-ionospheric signatures prior to M > 6.0 Taiwan earthquakes / J. Y. Liu, Y. I. Chen, S. A. Pulinets, Y. B. Tsai, Y. J. Chuo // *Geophysical Research Letters*. 2000. Vol. 27. P. 3113-3116, doi:10.1029/2000GL011395.
3. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements / J. Y. Liu, Y. J. Chuo, S. J. Shan, Y. B. Tsai, Y. I. Chen, S. A. Pulinets, S. B. Yu // *Annales Geophysicae*. 2004. Vol. 22, N. 5. P. 1585-1593, doi:10.5194/angeo-22-1585-2004.

4. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly / J. Y. Liu, Y. I. Chen, Y. J. Chuo, C. S. Chen // Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111(A5), doi:10.1029/2005JA011333.
5. A statistical study of ionospheric earthquake precursors monitored by using equatorial ionization anomaly of GPS TEC in Taiwan during 2001–2007 / J. Y. Liu, C. H. Chen, Y. I. Chen, W. H. Yang, K. I. Oyama, K. W. Kuo // Journal of Asian Earth Sciences. 2010. Vol. 39, N 1-2. P. 76-80, doi:10.1016/j.jseaes.2010.02.012.
6. Liu Jing, Jianping Huang, Xuemin Zhang. Ionospheric perturbations in plasma parameters before global strong earthquakes // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, N 5. P. 776-787, doi:10.1016/j.asr.2013.12.029.
7. Anomalous variation in total electron content (TEC) associated with earthquakes in India during September 2006 – November 2007 / O. P. Singh, V. Chauhan, V. Singh, B. Singh // Physics and Chemistry of the Earth. 2009. Vol. 34, N 6-7. P. 479-484, doi:10.1016/j.pce.2008.07.012.
8. Le H., Liu J. Y., Liu L. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M 6.0+ earthquakes during 2002–2010 // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116(A2), doi:10.1029/2010JA015781.
9. Masci F. The study of ionospheric anomalies in Japan Area during 1998-2010 by Kon et al.: An inaccurate claim of earthquake-related signatures? // Journal of Asian Earth Sciences. 2012. Vol. 57. P. 1-5, doi:10.1016/j.jseaes.2012.06.009.
10. Kon S., Nishihashi M., Hattori K. Ionospheric anomalies possibly associated with M 6.0 earthquakes in the Japan Area during 1998-2010: Case studies and statistical study // Journal of Asian Earth Sciences. 2011. Vol. 41, N 4-5. P. 410-420, doi:10.1016/j.jseaes.2010.10.005.
11. Золотов О. В., Намгаладзе А. А., Прохоров Б. Е. Особенности вариаций полного электронного содержания ионосферы в периоды подготовки землетрясений 11 марта 2011 г. (Япония) и 23 октября 2011 г. (Турция) // Химическая физика. 2013. Т. 32, № 9. С. 20-26, doi:10.7868/S0207401X1309015X.
12. Золотов О. В. Эффекты землетрясений в вариациях полного электронного содержания ионосферы: дис. ... к.ф.-м.н. [Электронный ресурс] // Санкт-Петербургский государственный университет: сайт // Архив защит диссертаций. URL: <http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dislist/details/14/470> (дата обращения: 18.12.2015).
13. Давиденко Д. В. Диагностика ионосферных возмущений над сейсмоопасными регионами: автореф. дис. ... к. ф.-м. н. [Электронный ресурс] // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: сайт. URL: [http://ipg.geospace.ru/ref/20130716/auto\\_Davidenko.pdf](http://ipg.geospace.ru/ref/20130716/auto_Davidenko.pdf) (дата обращения: 18.12.2015).
14. A nonlinear background removal method for seismo-ionospheric anomaly analysis under a complex solar activity scenario: A case study of the M 9.0 Tohoku earthquake / L. He, L. Wu, S. Pulnits, S. Liu, F. Yang // Advances in Space Research. 2012. Vol. 50. P. 211-220, doi:10.1016/j.asr.2012.04.001.

*Сведения об авторе*

**Золотов Олег Владимирович,**

к.физ.-мат.н., младший научный сотрудник кафедры общей и прикладной физики, Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, [zolotovo@gmail.com](mailto:zolotovo@gmail.com)

**М. И. Карпов**

## **ФОРМИРОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОДЫ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

### **Аннотация**

Рассмотрен физический механизм формирования в ионосфере мезомасштабных электрических полей над областями подготовки землетрясений в результате действия стороннего электрического тока, текущего над тектоническим разломом. В отличие от электрического тока проводимости, сторонний электрический ток создается неэлектрическими силами, в результате гравитационного оседания и конвективного переноса заряженных частиц разноименных знаков и, по сути, аналогичен грозовому электрическому току, заряжающему ионосферу положительно относительно Земли. Выполнены количественные оценки плотности сейсмогенного электрического тока, которая при условии накопления крупных заряженных частиц с замедленной рекомбинацией превышает плотность электрических токов хорошей погоды на несколько порядков.

### **Ключевые слова:**

*сторонний электрический ток, атмосфера, ионосфера, аэрозоли, землетрясения, облака, электрическое поле.*

**М. I. Karpov**

## **FORMATION OF THE MESOSCALE ELECTRIC FIELD IN THE IONOSPHERE DURING PREPARATION OF EARTHQUAKES**

### **Abstract**

The physical mechanism of the mesoscale electric field generation in the ionosphere over the regions of seismic activity is considered. The mechanism is based on the generation of extraneous electric current flowing over the tectonic fault. As opposite to the conductivity electric current the extraneous current is created by the non-electric forces, as a result of gravitational sedimentation and convectional transport of oppositely charged particles. It has the same origin as thunderstorm current which charges the ionosphere positively in relation to the Earth. The quantitative estimations of the seismogenic electric current are performed. It has been shown that its density exceeds the density of the fair-weather current for several orders under conditions where large charged particles with the slow recombination rate accumulate.

### **Keywords**

*extraneous electric current, atmosphere, ionosphere, aerosols, earthquakes, clouds, electric field.*

### **Введение**

Мезомасштабные возмущения электрического поля в ионосфере, наблюдаемые спутниками над эпицентрами землетрясений на стадиях их подготовки [5, 17], воздействуют на ионосферу посредством электромагнитного дрейфа плазмы  $F2$ -слоя [15] и создают характерные возмущения электронной концентрации [2]. Формирование сейсмогенного электрического поля связывают с возникновением дополнительного электрического тока, текущего над разломом [9, 16, 18], который, по расчетам [12, 13, 15], должен превышать обычные токи хорошей погоды на несколько порядков, чтобы создать наблюдаемые возмущения. В настоящей работе предлагается физический механизм генерации таких токов и даются их количественные оценки.

### **Механизм генерации стороннего электрического тока**

Свободные электрические заряды в атмосфере образуются в результате ионизации воздуха, главным образом, галактическими космическими лучами, максимум ионизации которых приходится на высоту около 13-15 км [6], и вследствие естественной радиоактивности у поверхности Земли [11]. Свободные электроны быстро прилипают к тяжелым нейтральным молекулам, а также к аэрозолям – крупным частицам различного происхождения (континентального, океанического, антропогенного) – пыли, пепла, частиц металлов, капель воды, льдинок и т. д. – с размерами от нескольких сотен ангстрем до нескольких микрон. Скорость рекомбинации крупных заряженных частиц в зависимости от их размера может быть меньше скорости рекомбинации первичных зарядов на четыре порядка [8], что способствует увеличению концентрации зарядов.

Возникшие ионы выступают в роли ядер конденсации водяных паров. Далее рост капель до размеров 1-2 мкм осуществляется преимущественно посредством коагуляции – процесса слипания капелек воды в более крупные образования – и приводит к формированию облаков [1, 3]. При этом выделяется скрытая теплота, равная теплоте парообразования и способствующая усилению потоков восходящего воздуха. На отрицательно заряженных ядрах конденсация происходит эффективнее, поскольку для конденсации на положительно заряженных ядрах требуется большая насыщенность водяного пара. За счет большего размера отрицательных зарядов и большей массы они увлекаются вниз силой тяжести, а легкие положительно заряженные частицы – вверх вместе с восходящими потоками теплого воздуха. Таким образом, в поле силы тяжести и градиентами давления происходит разделение и вертикальный перенос противоположно заряженных частиц, т. е. возникает электрический ток, получивший название стороннего.

В отличие от тока хорошей погоды, определяемого электрической проводимостью воздуха и фоновым электрическим полем, направленного к Земле, сторонний ток создается неэлектрическими силами и направлен в противоположную сторону. Сторонний электрический ток присутствует всегда и наиболее интенсивен в областях грозовой активности, заряжая ионосферу положительно относительно Земли и создавая разность электрических потенциалов между ними. В зависимости от изменения атмосферных условий, температуры и влажности воздуха, состава и концентрации пылевых и водных аэрозолей, а также условий ионизации сторонний ток увеличивается или уменьшается, создавая локальные увеличения или уменьшения разности электрического потенциала между Землей и ионосферой.

При землетрясениях сторонний электрический ток значительно увеличивается в области их подготовки. Во-первых, за счет возникновения дополнительных источников ионизации воздуха по сравнению с обычными условиями. Ускоренному ионообразованию способствует повышенная концентрация радиоактивных частиц в приземном слое, выталкиваемых из тектонического разлома, превышающая фоновые значения в несколько раз [11]. Во-вторых, увеличение концентрации почвенных газов и аэрозолей, формирование ионных кластеров в ходе процессов нуклеации способствуют увеличению концентрации крупных заряженных частиц вследствие их замедленной рекомбинации по сравнению с первичными ионами и электронами. В-третьих, разделению и переносу электрических зарядов способствуют восходящие потоки тепла над активными разломами, которые представляют собой крупномасштабные области (от нескольких тысяч до десятков тысяч

квадратных километров) с повышенной на 2-4° температурой, образующиеся за 4-20 дней до землетрясения и регистрируемые спутниками в виде убегающего длинноволнового излучения в инфракрасном диапазоне [19].

Условия, способствующие усилению стороннего электрического тока и его изменению, появляются не только при землетрясениях, но и при извержении вулканов вследствие выбросов в атмосферу большого количества пепла, при тайфунах и штормах, при пылевых и снежных бурях, т. е. при тех природных явлениях, которые сопровождаются увеличением концентрации в воздухе тяжелых частиц (пылевых и водяных аэрозолей), и характеризуются наличием масс восходящего теплого и влажного воздуха. Механизм генерации электричества при данных процессах схож с механизмом возникновения тока зарядки глобальной электрической цепи при грозовой активности. Отличия заключаются лишь в интенсивности генерируемого стороннего электрического тока, продолжительности процесса и площади его проявления.

Связь землетрясений и формирования облачности обсуждалась в [10, 16], а данные наблюдений облачных формирований в преддверии землетрясений представлены в [7, 14], где были выявлены образования крупномасштабных линейнообразных облаков, которые, в отличие от "обычных" облаков, гонимых ветром и изменяющихся по форме, остаются "привязанными" к тектоническому разлому.

Те же процессы, способствующие усилению стороннего электрического тока в периоды сейсмической активности, оказывают существенное влияние на электрический ток проводимости. Дополнительная ионизация воздуха продуктами распада радона, с одной стороны, увеличивает концентрацию зарядов, что приводит к увеличению электрической проводимости воздуха. С другой стороны, повышенная концентрация крупных заряженных частиц приводит к увеличению частоты упругих и неупругих столкновений, и, соответственно, возрастает роль силы трения, уменьшающей проводимость. Итоговый результат – увеличение или уменьшение интенсивности тока проводимости – будет зависеть от того, какой из двух процессов станет доминирующим.

Результирующий вертикальный электрический ток, текущий между Землей и ионосферой, является суммой тока проводимости и стороннего электрического тока, создаваемого неэлектрическими силами, и его изменение приводит к изменению электрического потенциала между Землей и ионосферой.

Денисенко и др. [4] показали, что изменения электрической проводимости атмосферы даже при наличии дополнительных источников в виде радиоактивных газов, эманлирующих из разлома, не могут изменять напряженность электрического поля в ионосфере более чем на несколько мкВ/м. Такие значения не согласуются с измерениями спутниками DEMETER и Intercosmos-Bulgaria 1300 напряженности электрического поля над областями подготовки землетрясений, которые составляют порядка 5-15 мВ/м [5, 17]. Несоответствие данных спутниковых измерений сейсмогенных электрических полей с оценками, сделанными в работе [4], означает, что для корректного физико-математического описания электрических токов, текущих над тектоническими разломами, и моделирования соответствующих эффектов в ионосфере, помимо изменений электрической проводимости атмосферы, необходимо учитывать сторонние электрические токи, создаваемые неэлектрическими силами.

### Количественные оценки сейсмогенного электрического тока

Модель расчета результирующего электрического тока, текущего между Землей и ионосферой

$$j = \sum_i en_i v_i, \quad (1)$$

должна учитывать все процессы образования и потерь зарядов (ионизацию воздуха, рекомбинацию зарядов, их взаимодействие с нейтралами, конденсацию водяных паров и коагуляцию), а также все силы, действующие на них (силу тяжести, градиенты давления, а также действие фонового электрического поля и силу трения).

Уравнение движения для каждого сорта частиц в этом случае будет записано в виде:

$$\rho_i \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial t} = -\text{grad} p_i - n_i (\vec{E} + [\vec{v}_i \times \vec{B}]) - \sum_j n_j m_j \nu_{ij} (\vec{v}_i - \vec{v}_j) + n_i m_i \vec{g}.$$

Очевидно, что в зависимости от преобладания тех или иных сил и процессов, которые существенно зависят от состава и сорта частиц, а также атмосферных условий, результирующий электрический ток может быть направлен как Земле, так и к ионосфере. Это будет соответствовать переносу в ионосферу преимущественно положительных либо отрицательных зарядов, т. е. формированию в ионосфере электрических полей противоположных знаков. Их воздействие на ионосферу будет заключаться в формировании как положительных, так и отрицательных возмущений полного электронного содержания (увеличений и уменьшений электронной концентрации  $F2$  области) посредством электромагнитного дрейфа плазмы в скрещенных магнитном и электрическом полях.

Концентрации зарядов  $n_i$  находятся из уравнений непрерывности, которые из-за высокой плотности частиц в нижней атмосфере записываются в фотохимическом приближении:

$$\partial n_i / \partial t = Q_i - L_i, \quad (2)$$

где  $Q_i$  и  $L_i$  – скорости образования и потерь частиц сорта  $i$ :

$$Q_i = \int \sum_{\gamma} \Gamma_{\gamma}^i d v,$$

$$-L_i = \int \sum_{\lambda} \Gamma_{\lambda}^i d v.$$

Здесь  $\Gamma_{\gamma}^i$  и  $\Gamma_{\lambda}^i$  – интегралы упругих столкновений, в которых частицы рождаются и исчезают, соответственно: ионизация воздуха, рекомбинации, химические реакции.  $Q$  и  $L$  зависят от концентрации принимающих участие в реакции компонент и скорости протекания реакции.

Поскольку первичные заряды быстро рекомбинируют друг с другом, имеет смысл рассматривать только долгоживущие заряженные аэрозоли, такие как отрицательные ионные связки  $O^- \cdot H_2O$ ,  $O_2^- \cdot (H_2O)_n$ ,  $NO_2^- \cdot H_2O$ ,  $NO_3^- \cdot HNO_3$  и положительно заряженные кластеры типа  $H_3O^+ (H_2O)_n$ ,  $H^+ (H_2O)_n$ ,  $NO^+ (H_2O)_n$ ,  $NO_2^+ (H_2O)_n$ ,  $NH_4^+ (H_2O)_n$ .

Для заряженных аэрозолей, считая их для упрощения одинакового размера, уравнение непрерывности (2) принимает вид [8]:

$$dn_i / dt = q_i - \alpha n_i^2 - \beta n_i Z \quad (3)$$

с решением в виде:

$$n(t) = \frac{\sqrt{\beta^2 Z^2 + 4\alpha q} - \beta Z}{2\alpha} \cdot \frac{1 - e^{-\sqrt{(\beta^2 Z^2 + 4\alpha q)t}}}{1 - e^{-\sqrt{(\beta^2 Z^2 + 4\alpha q)t}}}, \quad (4)$$

где  $q$  – скорость ионообразования;  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации;  $\beta$  – коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам;  $Z$  – концентрация аэрозольных частиц.

В стационарном случае и когда прилипание ионов к аэрозолям доминирует над процессами рекомбинации в процессах потерь ионов, выражение (3) записывается в виде:

$$n = q / \beta Z. \quad (5)$$

Скорость ионообразования  $q$ , даже при наличии дополнительных источников ионизации воздуха в виде продуктов распада эманурующего из разлома радона, изменяется незначительно по сравнению с обычными условиями и составляет порядка  $10^{-7} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Однако коэффициент прилипания  $\beta$  существенно зависит от размеров аэрозолей и варьируется в пределах  $10^{-10} - 10^{-14} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$  [8]. Считая, что концентрация аэрозолей составляет порядка  $10^8 - 10^9 \text{ м}^{-3}$ , вертикальная скорость находится в пределах  $0.1 - 10 \text{ м/с}$  и, подставляя данные значения в уравнение (1), получим диапазон значений плотности электрического тока:  $10^{-11} - 10^{-8} \text{ А/м}^2$ , т. е. на несколько порядков больше плотности электрического тока хорошей погоды (порядка  $10^{-12} \text{ А/м}^2$ ).

## Заключение

Условия среды над активным тектоническим разломом способствуют возникновению стороннего электрического тока вследствие образования, гравитационного оседания и конвективного переноса зарядов противоположных знаков. По своей природе он аналогичен грозовому току и создает дополнительную разность потенциалов между Землей и ионосферой. Благодаря малой скорости рекомбинации крупных заряженных частиц его интенсивность достаточно высока для формирования в ионосфере мезомасштабных возмущений электрического поля порядка 5-15 мВ/м относительно фоновых значений, регистрируемых спутниками над сейсмически активными областями.

## Литература

1. Ермаков В. И., Стожков Ю. И. Физика грозовых облаков: препринт № 2. М.: ФИАН, 2004.
2. Золотов О. В. Эффекты землетрясений в вариациях полного электронного содержания ионосферы: дис. ... канд. физ.-мат. н. Мурманск: МГТУ, 2015. 146 с.
3. Ивлев Л. С., Довгалюк Ю. А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 94 с.
4. Denisenko V. V., Ampferer M., Pomozov E. V., Kitaev A. V., Hausleitner W., Stangl G., Biernat H. K. On electric field penetration from ground into the ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vol. 102. P. 341-353, doi: 10.1016/j.jastp.2013.05.019.
5. Gousheva M., Danov D., Hristov P., Matova M. Ionospheric quasi-static electric field anomalies during seismic activity in August-September 1981 // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2009. Vol. 9. P. 3-15.

6. Gringel W., Rosen J. M., Hoffman D. J. Electrical structure from 0 up to 30 kilometers. The Earth's electrical environment. Washington: National Academic Press, 1986. P. 166-182.
7. Guangmeng G., Jie Y. Three attempts of earthquake prediction with satellite cloud images // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 13. P. 91-95.
8. Harrison R. G., Carslaw K. S. Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere // *Reviews of Geophysics*. 2003. Vol. 41.
9. Harrison R. G., Aplin K. L., Rycroft M. J. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2010. Vol. 72, N. 5-6. P. 376-381.
10. Harrison R. G., Aplin K. L., Rycroft M. J. Brief communication: Earthquake-cloud coupling through the global atmospheric electric circuit // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14. P. 773-777.
11. Heincke J., Koch U., Martinelli G. CO<sub>2</sub> and radon measurements in the Vogtland area (Germany) – a contribution to earthquake prediction research // *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22. P. 774-779.
12. Karpov M. I., Namgaladze A. A., Zolotov O. V. Modeling of total electron content disturbances caused by electric currents between the Earth and the ionosphere // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2013. Vol. 7, № 5. P. 594-598.
13. Kuo C. L., Huba J. D., Joyce G., Lee L. C. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges // *Journal of Geophysical Research*. 2011. Vol. 116. P. A10317.
14. Morozova L. I. Crustal geodynamic activity: manifestations in cloud fields // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. Vol. 53. P. 416-423.
15. Namgaladze A. A., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Zakharenkova I. E. Physical mechanism and mathematical modeling of earthquake ionospheric precursors registered in total electron content // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. Vol. 49, № 2. P. 252-262.
16. Pulnits S. A., Ouzounov D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55, № 4. P. 521-538.
17. Ryu K., Chae J. S., Lee E., Parrot M. Fluctuations in the ionosphere related to Honshu Twin large earthquakes of September 2004 observed by the DEMETER and CHAMP satellites // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2014. Vol. 121, P. A. P. 110-122.
18. Sorokin V. M., Yashchenko A. K., Hayakawa M. Electric field perturbation caused by an increase in conductivity related to seismicity-induced atmospheric radioactivity growth // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2007. Vol. 1, № 6. P. 644-648.
19. Tronin A. A. Remote sensing and earthquakes: A review // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. Vol. 31, N 4-9. P. 138-142.

*Сведения об авторе*

**Карпов Михаил Иванович,**

младший научный сотрудник кафедры общей и прикладной физики, Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, mikhailkarpov@hotmail.com

**М. В. Филатов, М. В. Швец, С. В. Пильгаев, А. В. Ларченко, С. А. Черноус**

## **ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ КАК ИНДИКАТОР УСТОЙЧИВОСТИ СИГНАЛА GPS-ПРИЕМНИКА**

### **Аннотация**

Представлены доказательства того, что вариации состояния ионосферы, определяемые полярными сияниями, оказывают влияние на сигналы высокоорбитальных навигационных спутников. Также предпринято сопоставление планетарной модельной картины появления полярных сияний и планетарной картины неоднородностей полного электронного содержания, определяемой по данным навигационного сигнала двухчастотных приемников, которое показало, что обе картины имеют форму овала, и данные о пространственно-временном распределении полярных сияний могут являться маркером состояния областей высокоширотной ионосферы, ответственных за распространение навигационных сигналов.

### **Ключевые слова:**

*навигационные системы, авроральные возмущения, полярные сияния.*

**M. V. Filatov, M. V. Shvets, S. V. Pilgaev, A. V. Larchenko, S. A. Chernous**

## **AURORAS AS AN INDICATOR OF THE STABILITY OF THE GPS SIGNAL RECIEVER**

### **Abstract**

This paper presents evidence that aurora determined ionospheric variations affects the signals high orbital navigation satellites. A comparison of the planetary model pictures of auroral oval and planetary pattern of the total electron content irregularities has been made. The irregularities determined according to the navigation signal of dual-frequency receivers in different stations. It has been shown that both auroral oval and auroral irregularities planetary pictures have the shape of an oval. Thus, the data on the spatial and temporal distribution of auroras could be a marker of the state of polar ionosphere areas responsible for the quality of navigation signals.

### **Keywords:**

*navigation systems, auroral disturbances, aurora.*

### **Введение**

В настоящее время изучению флуктуаций и сцинтилляций ГЛОНАСС/GPS сигналов уделяется всё большее внимание в ионосферных исследованиях, навигации, космической геодезии, радиосвязи [1]. Амплитудные флуктуации могут привести к срывам и потери слежения сигнала, особенно это относится к районам Арктики [2]. Интенсивные флуктуации могут привести к большим погрешностям позиционирования, а в отдельных случаях к невозможности определения местоположения. Подходы к решению задачи улучшения работы навигационных систем в Арктике опираются на тот факт, что при высыпаниях электронов и протонов в полярную ионосферу основные эмиссии полярных сияний возбуждаются одновременно с ионизацией атомов и молекул верхней атмосферы. Это приводит к тому, что при таких высыпаниях основные эмиссии полярных сияний возбуждаются одновременно с ионизацией атомов и молекул верхней атмосферы. Само увеличение структуризации ионосферы (это увеличение как количества, так и интенсивности ионосферных

неоднородностей во время полярных сияний) может привести к ухудшению качества приёма GPS/ГЛОНАСС-сигналов в высоких широтах, что ведет в конечном итоге к ухудшению качества позиционирования, а во время магнитосферных возмущений к невозможности определения местоположения объекта. В настоящей работе авторы хотят показать, как использовать сияния в качестве диагностического инструмента для оценки вариаций полного электронного содержания и показать возможность прогнозирования ошибок позиционирования, связанных с вторжением частиц в полярную ионосферу на основе предсказания локализации аврорального овала.

## **Материалы и методы**

### ***Локальные эффекты***

В работах [3, 4] было обнаружено, что при ограничении поля зрения (диаграммы направленности) навигационного приемника с экваториальной стороны, при появлении в этом поле полярных сияний, ошибки позиционирования увеличиваются или происходит нарушение целостности системы (сигнал полностью исчезает). Этот результат, полученный при измерениях на одночастотном приемнике, авторы предложили распространить на регистраторы навигационных сигналов при работе с полной диаграммой направленности, в том числе и на двухчастотные приемники при условии, что полярные сияния полностью охватывают поле зрения приемника. Это предположение встретило возражения, так как, во-первых, чувствительность и избирательность двухчастотного приемника уже учитывают текущее состояние ионосферы, а во-вторых, можно выбрать созвездие навигационных спутников к экватору от зоны полярных сияний, чтобы обеспечить нормальную работу системы.

Снять эти возражения можно экспериментальной проверкой гипотезы [3]. Необходимо было выбрать геофизическую ситуацию (которая случается не часто), когда полярные сияния охватывают полностью диаграмму направленности приемника. В этой работе использовались непрерывные наблюдения полярных сияний камерой всего неба с разрешением 10 сек на станции Баренцбург (Шпицберген)  $78^{\circ}05'N$   $14^{\circ}12'E$  и одновременные измерения навигационного сигнала на той же станции двухчастотным приемником Javad of Маhog Compaу. Этот приемник позволяет получать сигналы двух навигационных систем GPS и GLONASS, сбор данных идет с частотой 1 Гц, которая позволяет идентифицировать мелкомасштабные неоднородности и процессы в полярной ионосфере.

### ***Планетарные эффекты***

В связи с работами [2, 3, 5, 6] по связи вариаций полярных сияний как индикатора состояния полярной ионосферы с параметрами полного электронного содержания (ПЭС) представляет интерес выяснить, насколько похожи или отличны планетарные распределения неоднородностей ПЭС и сияний аврорального овала. Для этого мы будем использовать карты неоднородностей, полученные из мировой сети навигационных данных в формате RINEX (Receiver-Independent Exchange) и обработанные в западном филиале ИЗМИРАН [7-9], с модельным представлением оптического аврорального овала, созданным российскими и норвежскими учеными [10, 11],

размещенном на сайте обсерватории им. Хенриксена Норвежского университета на Шпицбергене (<http://kho.unis.no>). Использование обобщенных эмпирических данных зависимости положения овала полярных сияний от виртуального 15-минутного Кр-индекса [12-14], получаемого по данным спутника ACE в точке либрации в реальном времени, дает возможность краткосрочного прогноза полярных сияний по этим данным с опережением реальных авроральных возмущений на Земле от десятков минут до полутора часов в зависимости от скорости солнечного ветра. Если удастся сопоставить положение пространственно-временного расположения неоднородностей ПЭС и овала сияний, то это будет означать, что по данным прогноза положения полярных сияний можно будет осуществить прогноз неоднородностей ПЭС в ионосфере высоких широт.

### Локальное определение зависимости сигнала отдельных навигационных спутников от местоположения полярных сияний

Для проверки гипотезы [3] был выбран день 24.11.2009, который характеризовался магнитной бурей и полярными сияниями, покрывающими практически весь небосвод на станции Баренцбург. На рис.1 изображены карты местоположения навигационных спутников в угловых координатах и карты местоположения полярных сияний в тех же координатах для различных моментов времени. Можно видеть, что полярные сияния покрывают большую часть небосвода и почти полностью перекрывают поле зрения навигационного приемника в Баренцбурге около 18:20 UT. В этот период сигналы всех 8 наблюдаемых навигационных спутников были подвержены воздействию ионосферных возмущений, что видно из рис.1, на котором положение как GPS-, так и ГЛОНАСС-спутников наложено на картину распределения интенсивности сияний.

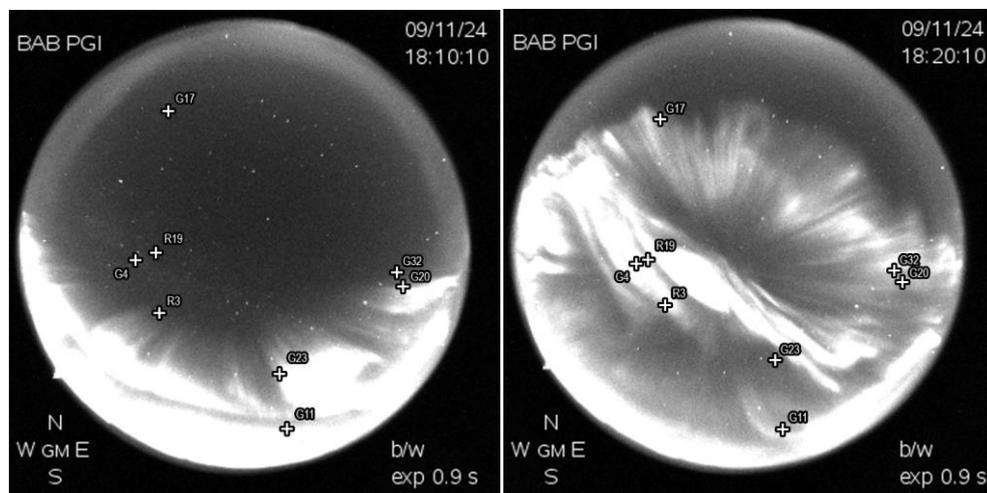


Рис.1. Положение полярных сияний и навигационных спутников в угловых координатах азимут – угол места для моментов времени, когда сияния перекрывают только часть небосвода (левая часть рисунка) и когда они практически полностью перекрывают небосвод (правая часть)

Из рисунка 2а, который показывает данные, полученные с отдельного спутника рабочего созвездия, мы можем видеть, что вблизи рассматриваемого интервала времени сигнал спутника GPS G17 вообще полностью пропадает. При этом на спутнике ГЛОНАСС R19 (рис.2б) резко возрастает вариабельность ПЭС. Сигналы, полученные от других спутников, демонстрируют эффекты, подобные эффекту, приведенному на рис.2а, или же возрастание вариабельности ПЭС, подобные рис.2б.

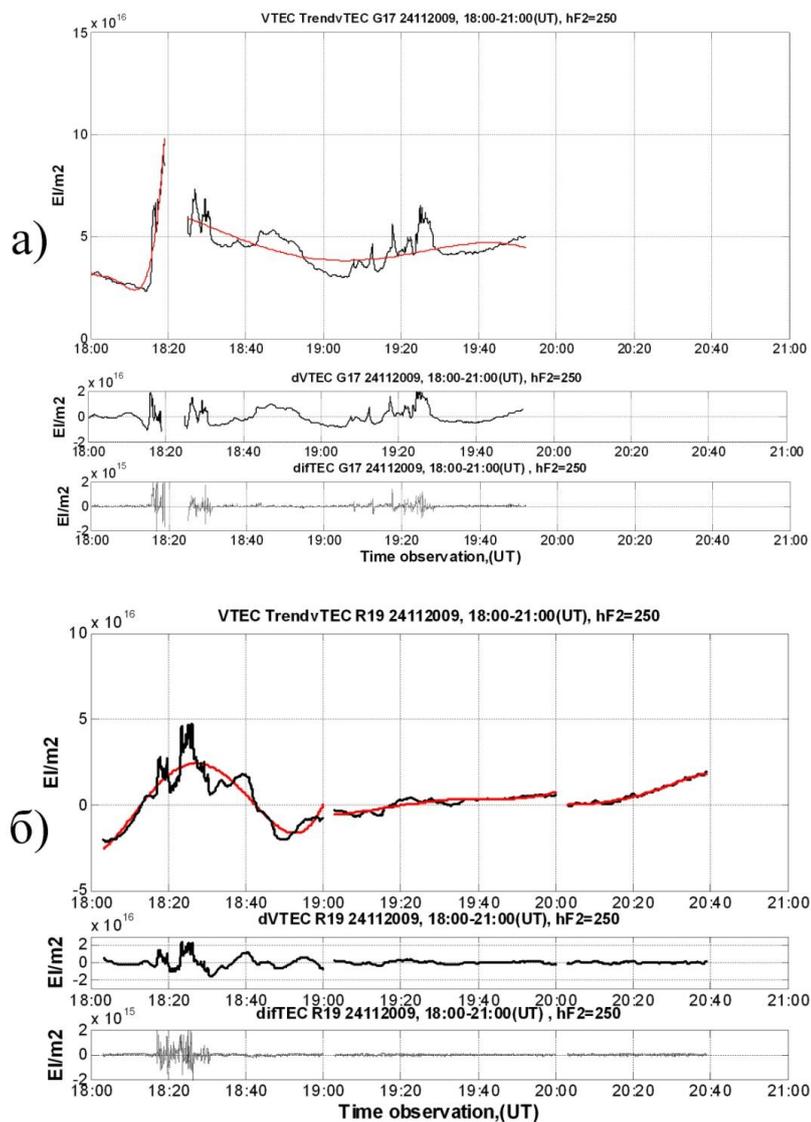


Рис.2. Истинный вертикальный ТЕС (VTEC) по фазе и его сглаженное значение (TrendvTEC) с учетом аппаратных задержек спутника и приемника (верхний график), вариации вертикального ТЕС (dVTEC) (отклонение относительного наклонного ТЕС от его фонового значения – средний график), скорость изменения вертикального ТЕС (difTEC): а – для GPS-спутника G17; б – для ГЛОНАСС-спутника R19

В то же время для интервала времени вблизи 18.10 UT резких изменений ПЭС не обнаруживается, а изображение положения спутников и полярных сияний свидетельствует о возможности беспрепятственного прохождения навигационного сигнала от космического аппарата к приемнику. Такая ситуация имеет место потому, что полярные сияния не полностью перекрывают поле зрения приемника от сигналов других спутников.

### Сопоставление положения аврорального овала с пространственно-временным распределением неоднородностей ПЭС

Для сравнения и исследования взаимного расположения распределений оптических полярных сияний были использованы данные по магнитной буре 6-7 января 2015 г., которая характеризовалась следующими параметрами (максимальный  $Kp = 6$ ,  $AE = 1327$  нТл,  $Dst = -99$  нТл). При помощи программного обеспечения, разработанного для прогноза обнаружения сияний аврорального овала [10-12], были построены профили овалов полярных сияний и совмещены с профилями неоднородностей для 4 станций (AB18 66.71N 162.61W, TIXI 71.38N 128.52E, KIRO 67.51N 21.03E, NNVN 61.47N 44.90W; рис.3.).

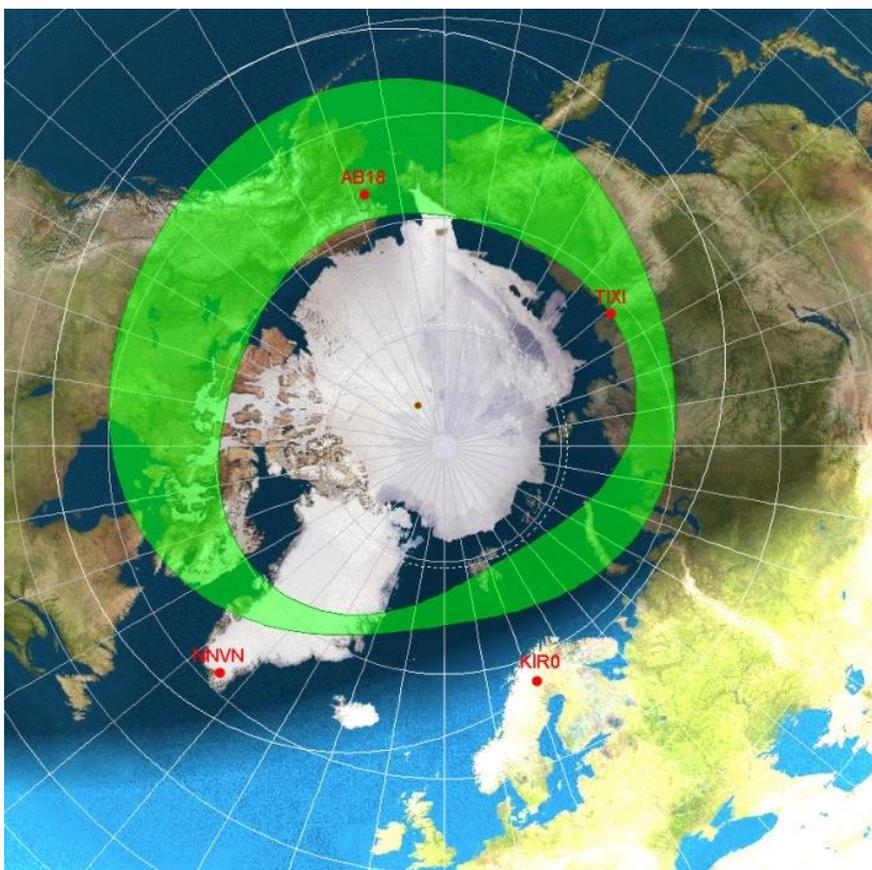


Рис.3. Положение овала полярных сияний относительно станций приема навигационного сигнала 07.01.2015 10:30 UT

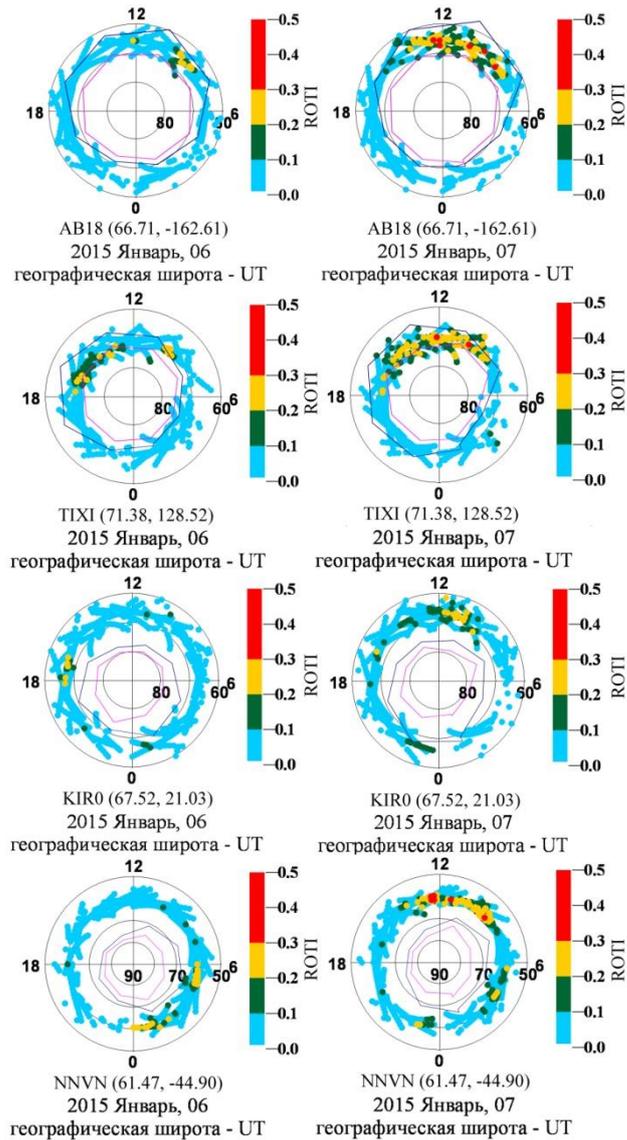


Рис.4. Пространственные распределения сияний и неоднородностей ПЭС для спокойного уровня 06.01.2015 и возмущенного 07.01.2015

На рисунке 4 представлены пространственные распределения сияний и неоднородностей ПЭС для спокойного уровня 06.01.2015 и возмущенного 07.01.2015. Очевидно, что при различной возмущенности картины распределений могут значительно отличаться.

Сразу отметим важную особенность при сравнении пространственных распределений сияний и неоднородностей ПЭС в период магнитной бури 07.01.2015. И те и другие распределения имеют овальную форму с максимальной шириной и интенсивностью в полуночные часы местного времени. Причем именно на тех станциях, которые расположены вблизи полуночи, наблюдается хорошее совпадение фигур.

Как видно из рис.4, на станциях AB18 и TIXI наблюдается совпадение овалов сияний и неоднородностей. Это соответствует ночному времени суток. Однако на станциях KIR0 и NNVN овалы не совпадают. Это может быть связано как с географическим положением станций, так и с высотой сияний.

### **Заключение**

В работе рассмотрена возможность диагностики и прогноза пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС, ответственных за качество приема навигационного сигнала на основе наблюдений полярных сияний как маркера этого распределения. По локальным измерениям вариаций ПЭС и полярных сияний такая возможность показана. В рамках планетарных измерений пространственно-временных распределений продемонстрирован факт овального распределения того и другого явления. Высокая степень подобия наблюдается для ночной стороны овала, что может быть обусловлено тем, что именно там сконцентрированы дискретные формы сияний, на основе измерений которых сформулировано понятие аврорального овала. Высказано предположение, что на основе существующей методики прогноза параметров овала полярных сияний возможен и прогноз овала неоднородностей ПЭС. Приведенные данные могут быть полезны для повышения качества работы навигационных систем типа ГЛОНАСС и GPS.

### **Благодарности**

Авторы благодарят И. И. Шагимуратова (ЗФ ИЗМИРАН) за предоставление данных по неоднородностям ПЭС на сети станций. Ф. Сигернеса (UNIS, Норвегия) за консультации по использованию программного обеспечения. Работы выполнены при поддержке грантов РФФИ 14-05-98820 p\_север\_a и 14-07-00512.

### **Литература**

1. Afraimovich E. I., Perevalova N. P. GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere // Irkutsk: SC RRS SB RAMS. 2006. P. 480.
2. GPS scintillation in the high arctic associated with an auroral arc / A. M. Smith, C. N. Mitchell, R. J. Watson, R. W. Meggs, P. M. Kintner, K. Kauristie, F. Honary // Space Weather. 2008. 6. P. S03D01.
3. Chernouss S. A., Kalitenkov N. V. The dependence of GPS positioning deviation on auroral activity // International Journal of Remote Sensing. 2011. 32(1). P. 3005-3017.
4. Способ определения местоположения объекта / Н. В. Калитенков, А. Н. Калитенков, В. И. Милкин, Е. Д. Терещенко, С. А. Черноус // Описание изобретения к патенту RU 2484494 C1., 07.11.2011.
5. GPS phase fluctuations and ultraviolet images from the Polar satellite / J. Aarons, B. Lin, M. Mendillo, K. Liou, M. Codrescu // Journal Geophysical Research. 2000. 105. P. 5201-5213.
6. Исследование особенностей навигационных сигналов в период авроральных возмущений / С. А. Черноус, М. В. Швец, М. В. Филатов, И. И. Шагимуратов, Н. В. Калитенков // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 10.
7. Vertical TEC representation by IRI 2012 and IRI Plas models for European midlatitudes / I. E. Zakharenkova, Iu. V. Cherniak, A. Krankowski,

- I. I. Shagimuratov // Advances in Space Research. 2015. 55(8). P. 2070-2076, doi: 10.1016/j.asr.2014.07.027.
8. Phase fluctuations of GPS signals associated with aurora / I. Shagimuratov, S. Chernous, Iu. Cherniak, I. Zakharenkova, I. Efishov // Proceedings of the 9th European conference on antennas and propagation (Lisbon, 12-17 April 2015). Paper №1570053943, 2015.
  9. High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms / I. I. Shagimuratov, A. Krankowski, I. Efishov, Iu. Cherniak, P. Wielgosz, I. Zakharenkova // Earth Planets Space. 2012. Vol. 64, No 6. P. 521-529.
  10. Starkov G. V. Mathematical model of the auroral boundaries // Geomagnetism and Aeronomy. 1994. 34. P. 331-336.
  11. Real time aurora oval forecasting – SvalTrackII / F. Sigernes, M. Dyrland, P. Brekke, E. K. Gjengedal, S. Chernouss, D. A. Lorentzen, K. Oksavik, C. S. Deehr // Optica Pura y Aplicada (OPA). 2011. 44. P. 599-603.
  12. Feldstein, Y. I., Starkov G. V. The auroral oval and the boundary of closed field lines of the geomagnetic field // Planet. Space Sci. 1970. 18. P. 501-508.
  13. Starkov G. V. Statistical dependences between the magnetic activity indices // Geomagnetism and Aeronomy. 1994. 34. P. 101-103.
  14. Costello K. A. Moving the rice MSFM into a real-time forecast mode using solar wind driven forecast models: PhD dissertation. Houston: Rice University, TX, 1997.

*Сведения об авторах*

**Филатов Михаил Валерьевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
mijgun@yandex.ru

**Швец Михаил Васильевич,**

старший инженер, Полярный геофизический институт, г. Мурманск, shvec@pgi.ru

**Пильгаев Сергей Васильевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
pilgaev@pgia.ru

**Ларченко Алексей Викторович,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизического институт, г. Апатиты,  
alexey.larchenko@gmail.com

**Черноус Сергей Александрович,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, chernouss@pgia.ru

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

## **РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТИПА СВЕРТКИ С ПОМОЩЬЮ ИНВЕРСНОГО ФИЛЬТРА**

### **Аннотация**

Приведен метод решения уравнения типа свертки, позволяющий с помощью цифрового инверсного фильтра преобразовать отсчеты АЦП выходных напряжений антенных усилителей электрической и магнитных компонент поля в их значения в А/м и В/м в ограниченной полосе частот.

### **Ключевые слова:**

*компоненты электромагнитного поля, метод, инверсный фильтр.*

**O. M. Lebed, A. V. Larchenko, S. V. Pilgaev, Yu. V. Fedorenko**

## **DECONVOLUTION BY AN INVERSE FILTER**

### **Abstract**

The deconvolution method is discussed. It uses an inverse filter to transform ADC samples of bandlimited output voltage of sensors to electric and magnetic field values in A/m and V/m units.

### **Key words:**

*components of the electromagnetic field, method, inverse filter.*

### **Введение**

При обработке данных цифровой регистрации компонент электромагнитного поля, например при анализе электромагнитных возмущений, создаваемых удаленными молниевыми разрядами, сталкиваются с тем, что отсчеты аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на выходе регистрирующей системы являются сверткой напряженности электромагнитного поля и импульсной функции регистратора. При анализе компонент поля возникает обратная задача восстановления их значений по отсчетам данных, записанных регистратором.

Операция, обратная свертке, не является устойчивой, поскольку и импульсная функция регистратора, и экспериментальные отчеты данных в принципе неточны. При решении любой обратной задачи, в том числе и интегрального уравнения типа свертки, возникают три основных вопроса: 1) существует ли решение; 2) если решение существует, то является ли оно единственным; 3) устойчиво ли решение, т. е. приводят ли малые изменения исходных данных к малым изменениям решения. Если решение существует и оно единственное и устойчивое, то задача называется корректно поставленной. В противном случае, задача называется некорректно поставленной или некорректной. Задачи восстановления геофизических сигналов, как правило, являются некорректно поставленными, так как не выполняется ни одно из вышеперечисленных условий.

Для решения некорректных задач А. Н. Тихонов предложил универсальный метод, получивший в отечественной и зарубежной литературе название «метод регуляризации Тихонова» [1]. Регуляризация решения состоит в построении семейства обратных операторов, зависящих от некоторого

числового параметра  $\alpha$  (параметра регуляризации). Этот метод, безусловно, заслуживает внимания, поскольку он не использует априорной информации и требует лишь выбора параметра регуляризации. Однако при обработке длинной, в пределе бесконечной, последовательности данных, а также при работе в реальном времени, что является спецификой геофизических измерений, данный метод становится слишком сложно реализуемым и требующим большого количества времени для поиска решения.

Следует отметить, что задача обработки данных компонент поля обладает рядом особенностей. Во-первых, функции передачи аналоговой части регистраторов электрической и магнитных компонент являются дробно-рациональными функциями. Это очень важно, так как для такой функции передачи можно построить фильтр в  $z$ -области, позволяющий вести обработку потоков данных. Во-вторых, анализ временных зависимостей компонент поля ведется в ограниченной полосе частот, ширина которой меньше полосы частот регистратора.

В данной работе приведен предложенный авторами метод, позволяющий с помощью цифрового инверсного фильтра преобразовать отсчеты АЦП выходных напряжений антенных усилителей электрической и магнитных компонент поля в их значения в А/м и В/м в ограниченной полосе частот. Проведен анализ ошибок преобразования, причем в качестве эталонного сигнала использован импульс электромагнитного возмущения, создаваемого молниевым разрядом вблизи экватора.

### Инверсный фильтр для дробно-рациональной функции передачи

Известно, что функция передачи регистраторов электрической и магнитных компонент по определению является дробно-рациональной функцией вида  $P(s)/Q(s)$ , где  $P$  и  $Q$  – полиномы, а  $s$  – комплексная переменная. Для дробно-рациональной функции свойственно сохранение каузальности при переходе из  $s$ - в  $z$ -область. Еще одним ее свойством является то, что основные ошибки в определении реальной передаточной функции сосредоточены на ее краях. В этом случае, если взять сигнал в полосе, края которой будут достаточно далеко отстоять от краев передаточной характеристики регистрирующей системы, влияние ошибок, возникающих за счет неточности определения передаточной характеристики на краях, можно будет свести к минимуму даже без применения метода регуляризации.

Функциональная схема предлагаемого инверсного фильтра приведена на рис.1. Здесь  $E_i$  – измеряемая компонента поля;  $i=x, y, z$ ;  $P_i(s)/Q_i(s)$  – функции передачи каналов регистратора в виде дробно-рациональной функции аргумента;  $s=j\omega$ ;  $U(s)/V(s)$  – унифицированная функция передачи;  $W_i^{inv}(s)$  – инверсный фильтр для  $i$ -й компоненты.

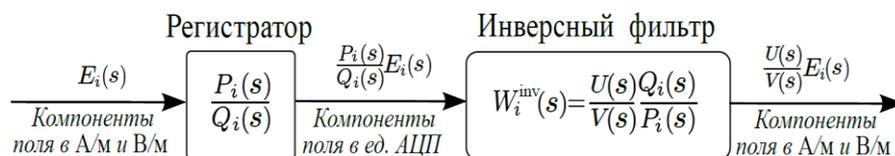


Рис.1. Схема метода решения обратной задачи восстановления компонент поля

Суть метода заключается в том, что сначала выбирается одинаковая для всех компонент поля, регистрируемых на всех станциях, передаточная функция  $H(s)$  вида  $H(s)=U(s)/V(s)$ ,  $s=2\pi jf=j\omega$ , где  $f$  – частота;  $U(s)$  и  $V(s)$  – рациональные функции  $s$ . Число полюсов у нее должно быть как минимум на два больше, чем у передаточной функции аналоговой части системы сбора. Два добавочных полюса нужны для ограничения полосы частот выходных сигналов. Выбором этой передаточной функции определяется полоса частот, в которой будет вестись последующий анализ измерений компонент поля. По определенным ранее передаточным функциям измерительных каналов компонент поля  $F_x(s)=P_x(s)/Q_x(s)$ ,  $F_y(s)=P_y(s)/Q_y(s)$  и  $F_z(s)=P_z(s)/Q_z(s)$  далее рассчитываются передаточные функции инверсных фильтров каждого канала:

$$W_{x,y,z}^{inv}(s) = \frac{H(s)}{F_{x,y,z}(s)} = \frac{U(s)}{V(s)} \cdot \frac{Q_{x,y,z}(s)}{P_{x,y,z}(s)}$$

Функция передачи инверсного фильтра  $W_{x,y,z}^{inv}(s)$  – это дробно-рациональная функция переменной  $s$ , число нулей которой как минимум на два меньше, чем число полюсов. Как известно [2], полюса и нули такой функции можно преобразовать в коэффициенты БИХ-фильтра  $W_{x,y,z}^{inv}(z)$  при помощи, например, билинейного или любого другого известного преобразования из  $s$ -области в  $z$ -область. Полученный БИХ-фильтр удобен для обработки длинных последовательностей данных. В принципе, такой фильтр даже может быть включен на входе записывающего устройства для преобразования отсчетов АЦП в отсчеты компонент поля в реальном масштабе времени. После обработки сигналов компонент поля инверсным фильтром результирующие амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики  $H(s)$  компонент одинаковы у всех измерительных каналов на всех станциях, а значения отсчетов сигналов компонент поля представляют измеряемые величины  $H_x$ ,  $H_y$  и  $E_z$  в А/м и в В/м.

### Выбор метода синтеза и апробация цифрового фильтра

Преобразование инверсного фильтра из  $s$ -области в  $z$ -область представляет большой интерес для ускорения обработки сигналов и особенно для обработки потоков данных в системах реального времени. Существует три наиболее часто применяемых метода синтеза цифровых фильтров (преобразования из  $s$ - в  $z$ -область), каждый из которых обладает своим рядом достоинств и недостатков [2]. В их число входят так называемый метод выборки-хранения (zero order hold – ZOH), билинейное преобразование и метод согласованного  $z$ -преобразования (matched pole/zero method – MPZ). Поскольку все эти методы могут быть применены для синтеза цифровых фильтров из передаточных характеристик измерительных каналов, перед авторами стояла задача выбора оптимального метода из перечисленных выше.

На рисунке 2а-с приведены АЧХ, ФЧХ и время групповой задержки, вносимой стандартной передаточной характеристикой в  $s$ -области и эти же характеристики, полученные тремя методами в  $z$ -области. Из рисунка следует, что ни один из методов преобразования инверсного фильтра из  $s$ - в  $z$ -область не показал хороших результатов. Особенно большие погрешности возникают вблизи частоты Найквиста (здесь она равна 256 Гц). Можно утверждать, что наблюдаемые отклонения этих характеристик от характеристик аналогового фильтра настолько велики, что не позволят с достаточной степенью точности восстановить значения компонент поля на входе измерительной системы.

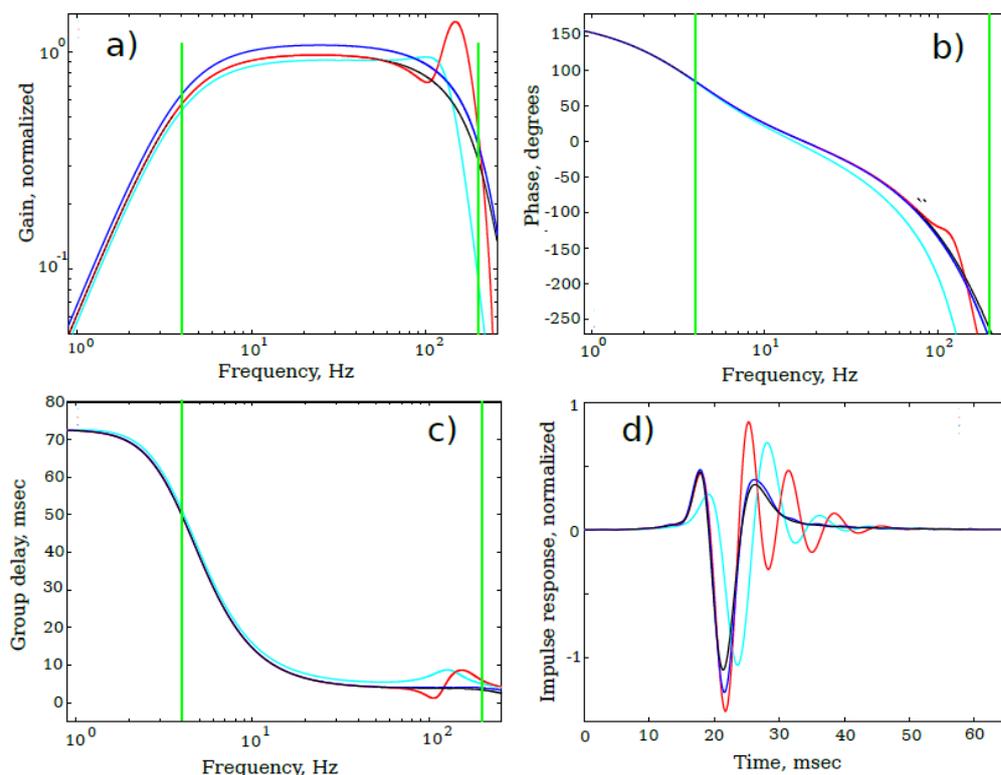


Рис.2. Сравнение методов синтеза цифрового фильтра в частотной и временной области:

a – АЧХ; b – ФЧХ; c – время групповой задержки; d – модельный импульс.  
 Вертикальные линии – выделенная инверсным фильтром полоса частот

Поскольку данная работа основана на исследовании импульсных сигналов электромагнитных возмущений во временной области, сравним модельный импульс, полученный при прохождении сигнала атмосфера через фильтр со стандартной характеристикой  $H(s)$ , с сигналом, пропущенным сначала через аналоговую часть регистратора с функцией передачи  $F(s)$ , а затем через инверсный БИХ-фильтр, полученный из  $W^{inv}(s)$  с помощью перечисленных выше трех методов перехода из  $s$ - в  $z$ -область. Результат сравнения представлен на рис.2d. Здесь наглядно показано, какие искажения будут присутствовать в восстановленном сигнале, если воспользоваться любым из обсуждаемых методов перехода из  $s$ - в  $z$ -область.

Известно, что цифровые фильтры вносят наибольшие отклонения от аналогового фильтра-прототипа в полосе частот, верхняя граница которой расположена вблизи частоты Найквиста  $F_q = F_s/2$  (см. рис.2). Очевидно, что если бы частота дискретизации была настолько высока, что частота Найквиста далеко отстояла от верхней частоты спектра данных, цифровой инверсный фильтр был бы близок по свойствам к аналоговому и результат его работы был бы практически неотличим от результата работы аналогового фильтра. Отсюда следует, что эти отклонения могут быть устранены повышением частоты

дискретизации перед применением инверсного фильтра, преобразованного в БИХ-фильтр.

Для того чтобы выбрать, во сколько раз надо повысить частоту дискретизации, оценим ошибку, вносимую каждым из трех методов преобразования сигнала из  $s$ - в  $z$ -область на примере восстановления модельного импульса, последовательно увеличивая частоту дискретизации. Мы повысили частоту дискретизации сигнала в 2, 4, 8 и 10 раз и для каждого из методов рассчитали относительную ошибку восстановления импульсного сигнала. Результаты расчетов сведены в таблицу.

Таблица

Относительная ошибка восстановления импульсного сигнала при преобразовании из  $s$ - в  $z$ -область для различных частот дискретизации, %

Метод преобразования/коэффициент увеличения частоты дискретизации	1	2	4	8	10
ZOH	90	27	9.5	5.9	4.9
Билинейное преобразование	53	11	2.5	0.53	0.4
MPZ	20	21	15	9.9	8.8

Из общих соображений ясно, что чем меньше частота дискретизации, тем более «плотную» запись можно создать, тем больше данных можно записать на один диск и тем менее мощный компьютер потребуется для обработки такой записи. Кроме того, чем ниже частота дискретизации, тем больше искажений возникнет при обработке в силу свойств цифровых фильтров. Из таблицы видно, что при увеличении частоты дискретизации в 2 раза ни одним из методов не достигается ошибки даже ниже 10%. Увеличив частоту дискретизации в 4 раза, мы наблюдаем хорошее совпадение модельного сигнала и сигнала, восстановленного с помощью билинейного преобразования. Здесь ошибка составляет всего 2.5%. Дальнейшее увеличение частоты дискретизации приводит к избыточно низкой ошибке для билинейного преобразования и к допустимой ошибке для двух оставшихся методов. Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальным решением задачи преобразования инверсного фильтра  $W^{inv}(s)$  из  $s$ - в  $z$ -область для импульсных сигналов является использование билинейного преобразования и повышение частоты дискретизации в 4 раза.

В заключение, на рис.3 (а-с) показаны АЧХ, ФЧХ и время групповой задержки инверсного фильтра и БИХ-фильтра, полученного преобразованием инверсного фильтра из  $s$ - в  $z$ -область с помощью билинейного преобразования, соответственно. На рис.3 (d) показан модельный сигнал и сигнал, восстановленный с помощью указанного БИХ-фильтра. Здесь частота дискретизации увеличена в 4 раза. Операция повышения частоты дискретизации выполнялась стандартным способом, описанным, например, в [2].

Из рисунка видно, что выбранный метод преобразования инверсного фильтра из  $s$ - в  $z$ -область и выбранный коэффициент повышения частоты дискретизации позволили получить хорошее совпадение результатов обработки сигнала атмосферика цифровым фильтром с результатами обработки того же сигнала аналоговым прототипом цифрового фильтра.

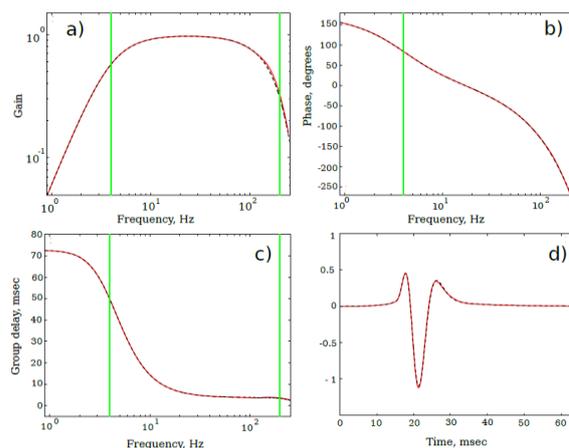


Рис.3. Сравнение инверсного фильтра и БИХ-фильтра, полученного с помощью билинейного преобразования:  
 а – АЧХ; б – ФЧХ; в – время групповой задержки; д – модельный импульс.  
 Вертикальные линии – выделенная инверсным фильтром полоса частот

### Выводы

Авторами предложен метод решения обратной задачи восстановления физической величины из отсчетов аналого-цифрового преобразователя выходного напряжения геофизического датчика, функция передачи которого является дробно-рациональной функцией. Описан способ расчета цифрового инверсного фильтра, который позволяет вести обработку как непрерывного потока данных в режиме реального времени, так и выделенных сегментов данных. Показано, что оптимальным преобразованием из  $s$ - в  $z$ -область является билинейное преобразование. Произведены оценки ошибок перехода из  $s$ - в  $z$ -область. Предложенный инверсный фильтр применен для анализа электромагнитных возмущений, создаваемых удаленными молниевыми разрядами.

### Литература

1. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с.

### Сведения об авторах

**Лебедь Ольга Михайловна,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, olgamihsh@yandex.ru

**Ларченко Алексей Викторович,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, alexey.larchenko@gmail.com

**Пильгаев Сергей Васильевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, pilgaev@pgia.ru

**Федоренко Юрий Валентинович,**

к. физ.-мат. н., доцент, заведующий сектором, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, yury.fedorenko@gmail.com

УДК 537.876.2

**С. В. Пильгаев, А. В. Ларченко, Ю. В. Федоренко**

## **МОДОВЫЙ СОСТАВ ПОЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ИОНОСФЕРНОГО ИСТОЧНИКА**

### **Аннотация**

Приводятся результаты обработки наземных наблюдений излучения ионосферного источника, образованного в результате воздействия на ионосферу мощным амплитудно-модулированным КВ-излучением стенда EISCAT/Heating, расположенного вблизи г. Тромсе. Эксперимент проводился с 17 по 26 октября 2014 г. Частоты модуляции КВ-излучения – 1017, 2017 и 3017 Гц. Регистрация генерируемого ионосферным источником излучения производилась двумя пространственно разнесенными ОНЧ-приемниками [1, 2] в обсерватории ПГИ Ловозеро и в районе г. Апатиты. Произведён расчёт поляризации горизонтального магнитного поля ионосферного источника. Показано, что она определяется условиями распространения в волноводе Земля – ионосфера и на частотах 1017 и 3017 Гц преимущественно линейна, а на частоте 2017 Гц – эллиптическая левая. Исследован модовый состав поля. Выявлено, что на частоте 1017 Гц распространение сигналов от ионосферного источника происходит только на TEM-мод, на частоте 3017 Гц – на трёх модах: TEM, TM01, TE01.

### **Ключевые слова:**

*ОНЧ, нагревный стенд, распространение, волновод Земля – ионосфера, поляризация, мода волновода.*

**S. V. Pilgaev, A. V. Larchenko, Yu. V. Fedorenko**

## **MODE CONTENT OF THE WAVEFIELD FROM ARTIFICIAL IONOSPHERIC SOURCE**

### **Abstract**

There are results of the ground-based measurements of the wavefield from ionospheric source created by EISCAT/Heating facility in Tromso. The experiment was carried from 17 to 26 October 2014. The radiated HF wave was modulated with frequencies 1017, 2017 and 3017 Hz. We recorded this signals using two spatially separated VLF receivers located in the Lovozero observatory and near Apatity town. Polarization of magnetic field from ionospheric source has been calculated. It has been shown that polarization is controlled by propagation condition in the Earth – ionosphere waveguide. A signal is predominantly linearly polarized at the frequencies 1017 and 3017 Hz, but has left-handed elliptical polarization at 2017 Hz. Mode composition of electromagnetic fields was studied. The signal at the frequency 1017 Hz propagated in transverse electromagnetic mode (TEM) while at 3017 Hz it propagated in TEM, TM1, and TE01 modes.

### **Key words:**

*VLF, ionospheric heater, propagation, Earth – ionosphere waveguide, polarization, waveguide mode.*

### **Введение**

Мощность низкочастотного источника, возникающего при модификации ионосферы мощным КВ-излучением, зависит от плотности тока в ионосфере на высотах 80-100 км, которая сильно изменяется со временем. Амплитуда низкочастотных волн от такого источника, регистрируемых на земной поверхности на расстоянии в несколько длин волн от него, определяется как

особенностями возбуждения волновода Земля – ионосфера источником, погруженным в ионосферу, так и условиями распространения низкочастотных волн в волноводе. Чтобы отделить эффекты, связанные с изменением мощности ионосферного источника, от эффектов возбуждения поля в волноводе и распространения волноводных мод, целесообразно использовать такие параметры электромагнитного поля в точке наблюдения, которые слабо зависят от мощности источника и в основном определяются физическими процессами, контролирующими возбуждение и распространение волноводных мод. Проведенные ранее эксперименты показали, что, несмотря на изменение амплитуд компонент поля на порядок, поляризация горизонтального магнитного поля остается относительно стабильной [3]. Этот факт дает возможность предположить, что такие характеристики горизонтального магнитного поля, как тип и степень поляризации, а также эксцентриситет и ориентация эллипса поляризации в основном определяются условиями распространения в волноводе, а не процессами в ионосфере.

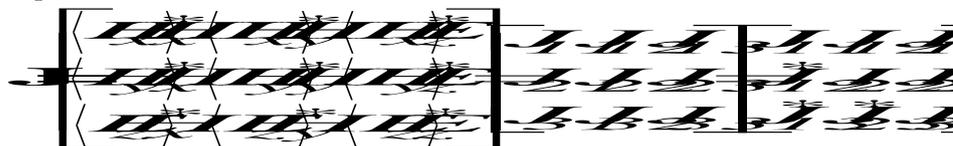
В данной работе приведены результаты наземных измерений локальных параметров поля ионосферного источника, образованного мощным модулированным КВ-излучением стенда EISCAT/Heating в направлении магнитного зенита. Нагрев ионосферы начался 26 октября в 15 ч UT и осуществлялся циклами по 15 мин с частотами модуляции 1017, 2017 и 3017 Гц в следующем режиме: 5 мин нагрева при каждой частоте модуляции, затем 10 мин перерыв. В 17 UT эксперимент был окончен. Регистрация сигналов проводилась стационарным приемником обсерватории ПГИ Ловозеро (67° 58' 31" N, 35° 4' 52" E) и мобильным комплектом в окрестности г. Апатиты, в точке с координатами (67° 30' 38" N, 33° 29' 36" E).

### Обработка сигналов

Для исследования структуры поля ионосферного источника при обработке данных, полученных в ходе эксперимента, мы использовали поляризационную матрицу, которая обладает следующими полезными свойствами:

- она оптимальна для увеличения отношения сигнал/шум за счет усреднения по времени;
- матрица сигнала в смеси с шумом равна сумме матрицы сигнала и матрицы шума;
- при обработке нестационарных сигналов позволяет найти компромисс между статистической устойчивостью результатов и разрешением по времени.

Поляризационная матрица для трех главных компонент электромагнитного поля:



Здесь  $H_x$  и  $H_y$  – северная и восточная компоненты магнитного поля;  $E_z$  – вертикальная компонента электрического поля. Угловые скобки означают усреднение по времени, \* – комплексно сопряженную величину.

Для трех компонент поля можно измерить угол, который образует вектор Пойнтинга  $S$  с первой осью системы координат, который отсчитывается от первой оси (в нашем случае это направление на север) в кратчайшем направлении на вторую ось (в нашем случае это направление на восток) до вектора Пойнтинга. Предполагается, что компоненты  $E_x$ ,  $E_y$  и  $H_z$  малы по сравнению с  $H_x$ ,  $H_y$  и  $E_z$  и ими можно пренебречь.



Для расчета характеристик поляризации горизонтального магнитного поля использовались приведенные ниже формулы [4]:

$$P_c = i(J_2 - J_1);$$

$$P_l = \sqrt{(J_1 + J_2)(J_1 - J_2)};$$

$$P = \sqrt{P_c^2 + P_l^2};$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{J_{21} + J_{12}}{J_{11} + J_{22}} \right);$$

Здесь  $P$  – средняя мощность горизонтального магнитного поля;  $P_l$  и  $P_c$  – средние квадраты поляризованных линейно и по кругу частей горизонтального магнитного поля соответственно;  $\gamma$  – угол между большой осью эллипса поляризации и первой осью системы координат.

### Обсуждение результатов

Ниже приведены основные закономерности поведения сигналов, зарегистрированных на станциях, на примере сеанса нагрева ионосферы 21 октября 2014 г. Из данных каждой станции были выбраны участки времени нагрева на частотах 1017, 2017 и 3017 Гц. Каждый из этих участков преобразован узкополосным фильтром с целью выделения полезного сигнала, а также оценен шум на частотах, сдвинутых на 0.25 Гц от частоты сигнала. Элементы поляризационной матрицы были вычислены для каждого отсчета данных и затем усреднены за время цикла передатчика.

На рисунке 1 приведены характеристики поляризации горизонтального магнитного поля на станциях obs. Ловозеро и Апатиты. Видно, что во всех случаях мощность шума значительно ниже мощности полезного сигнала. Поляризация горизонтального магнитного поля на частотах 1017 и 3017 Гц преимущественно линейна. На частоте 2017 Гц поляризация эллиптическая левая. Этот факт дает возможность предположить, что распространение искусственного ОНЧ-излучения на частотах 1017 и 3017 Гц, далеких от частоты поперечного резонанса волновода Земля – ионосфера, происходит преимущественно на поперечной электромагнитной (ТЕМ) и поперечной магнитной (ТМ) модах, а на частоте 2017 Гц, близкой к частоте поперечного резонанса, доминирует левополяризованная мода, хорошо отражающаяся на этой частоте от анизотропной верхней стенки волновода.

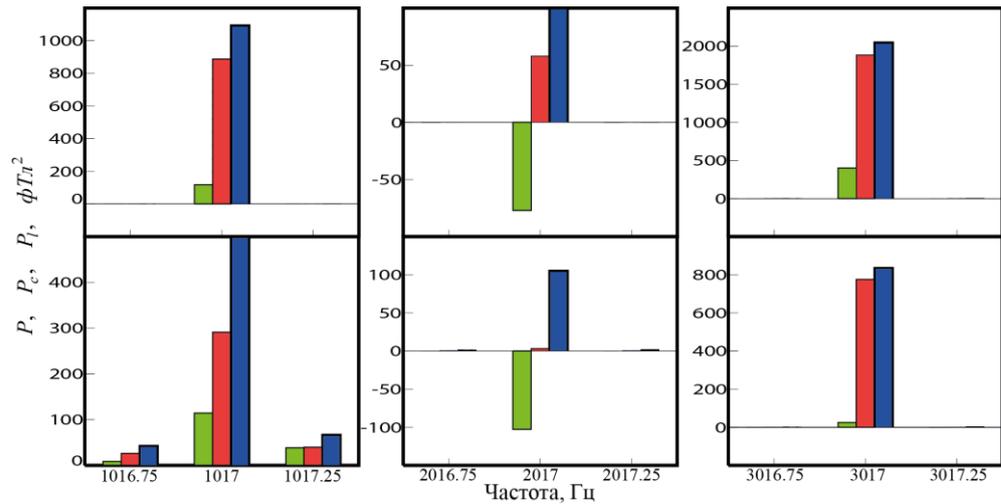


Рис.1. Средняя мощность  $P$  (синие столбцы), линейно  $P_1$  (красные) и циркулярно  $P_c$  (зеленые) поляризованные части сигнала и те же величины, измеренные на частотах, отстоящих от частоты сигнала на 0.25 Гц, зарегистрированных на станциях obs. Ловозеро (сверху) и Апатиты (снизу)

Для детального анализа структуры поля и механизмов распространения сигнала низкочастотного источника были выбраны записи приемника obs. Ловозеро, поскольку здесь отмечалось наибольшее соотношение сигнал/шум на всех частотах. Отметим, что поляризация горизонтального магнитного поля на частотах 1017 и 3017 Гц здесь была близка к линейной. Для оценки модового состава сигналов, распространяющихся от ионосферного источника, мы преобразовали  $H_x$ - и  $H_y$ -компоненты поля в радиальную  $H_r$  и тангенциальную  $H_t$  компоненты, причем  $H_r$  направлена вдоль направления от источника, а  $H_t$  перпендикулярно к  $H_r$ . Ожидается, что ТЕМ- и ТМ-моды образуют  $H_t$ , а ТЕ-мода –  $H_r$ . Отношение  $|E_z|^2$  к  $|H_t|^2$  близко к  $Z_0^2$  у ТЕМ-моды и  $Z_0^2 \sin^2 \theta$  у ТМ-моды, где  $Z_0$  – волновое сопротивление свободного пространства;  $\theta$  – угол падения плоских волн, образующих ТМ-моду. Для высоты отражающего слоя в ионосфере от 65 до 75 км угол падения составляет 30-45 градусов, а отношение  $|E_z|^2$  к  $|H_t|^2$ , нормированное на  $Z_0^2$ , варьируется в диапазоне значений 0.5-0.7.

На рисунке 2 представлены вертикальная электрическая, тангенциальная и радиальная магнитные компоненты сигнала, зарегистрированного в obs. Ловозеро во время сеанса нагрева ионосферы 26 октября на частотах 1017 и 3017 Гц. На рис.3 приведены отношение  $|E_z|^2$  к  $|H_t|^2$  и направление вектора Пойнтинга. По оси абсцисс на рисунках показано время середины каждого цикла нагрева. Во время первого цикла нагрева на частоте 3017 Гц отношение сигнал/шум оказалось недостаточным для вычисления величины  $|E_z|^2/|H_t|^2$  и направления вектора Пойнтинга.

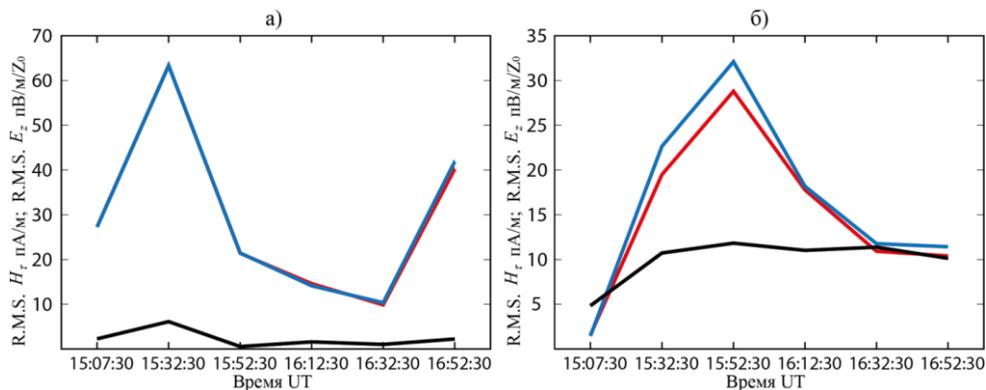


Рис.2. R.M.S. вертикальной электрической (красная линия), тангенциальной (синяя линия) и радиальной (чёрная линия) магнитных компонент на частотах 1017 (а) 3017 (б) Гц

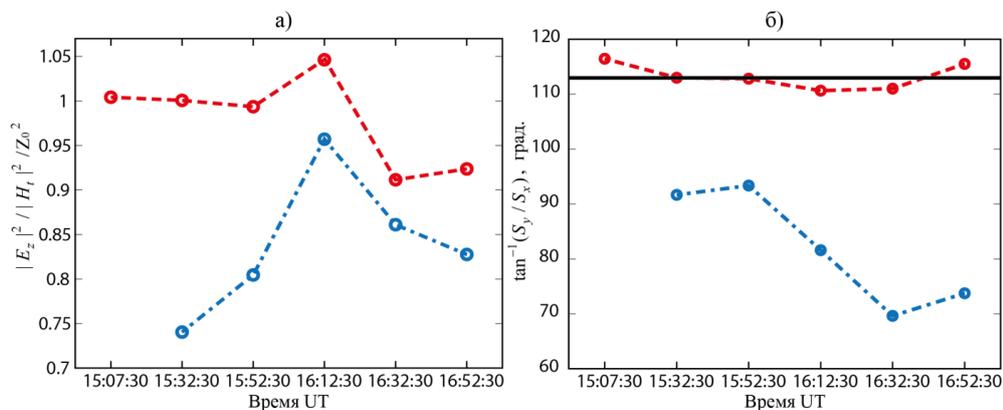


Рис.3. Отношение  $|E_z|^2$  к  $|H_t|^2$  (а) и направление вектора Пойнтинга (б) на частотах 1017 Гц (красная линия) и 3017 Гц (синяя линия). Чёрная линия показывает обратный азимут нагревного стенда

Из рисунков, демонстрирующих поведение направления вектора Пойнтинга и отношения  $|E_z|^2$  к  $|H_t|^2$  сигнала ионосферного источника, видно, что на частоте 1017 Гц, лежащей ниже частоты поперечного резонанса волновода Земля – ионосфера, отношение  $|E_z|^2$  к  $|H_t|^2$  близко к ожидаемому, а отклонение направления  $S$  от обратного азимута ионосферного источника мало и может быть объяснено ошибками измерений. Можно предположить, что сигнал ионосферного источника на этой частоте распространяется исключительно на ТЕМ-моду, в то время как ТЕ- и ТМ-моды являются запердельными. В пользу этого предположения также свидетельствует линейная поляризация сигнала, постоянное в течение двух часов отношение  $|E_z|^2$  к  $|H_t|^2$  и отсутствие радиальной компоненты магнитного поля.

Иная картина наблюдается на частоте 3017 Гц, где могут сосуществовать три моды: ТЕМ, ТЕ01 и ТМ01. Радиальная компонента магнитного поля на этой частоте значительно больше, чем на частоте 1017 Гц. Величина  $|E_z|^2/|H_t|^2$

нормированная на  $Z_0^2$  меньше, чем на частоте 1017 Гц, но все же, больше ожидаемых для ТМ-моды значений 0.5-0.7, по-видимому, из-за преобладающего вклада ТЕМ-моды в  $H_\tau$  по сравнению с ТМ. Из-за вклада ТЕ-моды направление вектора Пойнтинга не совпадает с обратным азимутом источника, отличаясь от него примерно на 20-40 градусов.

### **Заключение**

Проведенный анализ структуры поля искусственного ионосферного источника позволил подтвердить имеющиеся представления и уточнить сведения о возбуждении и распространении низкочастотных электромагнитных сигналов в волноводе Земля – ионосфера. В работе показано, что на частоте 1017 Гц сигнал ионосферного источника распространяется только на ТЕМ-моды, в то время как на частоте 3017 Гц сигнал имеет многомодовый состав. Оценка направления прихода электромагнитных волн на частотах выше частоты поперечного резонанса Земля – ионосфера из-за вклада ТЕ-моды не совпадает с направлением от источника, что заставляет с осторожностью относиться к оценкам углов прихода при анализе естественных ОНЧ-излучений.

### **Литература**

1. Универсальное устройство синхронизации данных от GPS приемника. / С. В. Пильгаев, О. И. Ахметов, М. В. Филатов, Ю. В. Федоренко // ПТЭ. 2008. Т. 3. С. 175-176.
2. Филатов М. В., Пильгаев С. В., Федоренко Ю. В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // ПТЭ. 2011. Т. 3. С. 73-75.
3. Polarization of ELF waves generated during “beat-wave” heating experiment near cutoff frequency of the Earth-ionosphere waveguide / Yu. Fedorenko, E. Tereshchenko, S. Pilgaev, V. Grigoryev, N. Blagoveshchenskaya // Radio Science. 2014. Vol. 49, Iss. 12. P. 1254-1264.
4. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976. С. 351-359.

### ***Сведения об авторах***

#### **Пильгаев Сергей Васильевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
pilgaev@pgia.ru

#### **Ларченко Алексей Викторович,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
alexey.larchenko@gmail.com

#### **Федоренко Юрий Валентинович**

к.физ.-мат.н., доцент, зав. сектором, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
yury.fedorenko@gmail.com

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

### **ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ СНЧ/ОНЧ-ПРИЕМНИК С ПРЕЦИЗИОННОЙ ПРИВЯЗКОЙ К МИРОВОМУ ВРЕМЕНИ**

#### **Аннотация**

Многофункциональный цифровой 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 кГц. Отличительной его особенностью является прецизионная синхронизация каждого отсчета цифровых данных с мировым временем с максимальной ошибкой, не превышающей 1 мкс. Основным назначением приемника является анализ структуры поля ОНЧ-волн в точке наблюдений и определение положения и динамики области выхода ОНЧ-излучений к наземному наблюдателю.

#### **Ключевые слова:**

*электромагнитные волны, азимутальный угол, структура волн.*

**S. V. Pilgaev, A. V. Larchenko, M. V. Philatov, A. S. Nikitenko,  
O. M. Lebed, Yu. V. Fedorenko**

### **THE THREE COMPONENTS VLF RECEIVER WITH THE PRECISE COUPLING TO THE UNIVERSAL TIME**

#### **Annotation**

This article concentrates on the multifunctional digital ELF/VLF-receiver which contains two antennae for the horizontal magnetic components of the electromagnetic ELF/VLF-emissions and a third for the vertical electric component over the range 30 Hz to 15 kHz in near-Earth space. The receiver's strongest feature is the fact that every single sample has GPS timing at UT with an accuracy of 0.1  $\mu$ s. The main function of the receiver is to analyze the wave field's structure at the observation point and to determine the position and the dynamics of the ELF-emissions' output area towards to the observer.

#### **Keywords:**

*electromagnetic waves, azimuth angle, wave structure.*

#### **Введение**

Исследование процессов генерации и распространения электромагнитных (ЭМ) волн СНЧ/ОНЧ-диапазона (30 Гц – 30 кГц) наземными станциями играет большую роль в изучении динамики земной ионосферы и магнитосферы. Помимо этого, на волнах СНЧ/ОНЧ-диапазона может осуществляться радиосвязь с объектами, а также производиться геолокация объектов.

Например, ЭМ-волны, возникающие в результате грозových разрядов (атмосферики), распространяются на частотах данного диапазона. Свисты – атмосферики, “захваченные” магнитными силовыми трубками, – могут приходить из магнито-сопряженных областей. Естественные излучения – хиссы и хоры – генерируются в магнитосфере на средних и высоких геомагнитных широтах и также распространяются на частотах ОНЧ-диапазона. Сети передатчиков, транслирующих на частотах СНЧ/ОНЧ-диапазона, могут быть использованы в навигации. Одной из таких сетей является радионавигационная

система “Альфа”. Также волны СНЧ-диапазона, ввиду их способности распространяться в соленой воде и в земле, могут использоваться для связи с подводными лодками и подземными объектами.

Затухание на частотах порядка 30 Гц – 30 кГц мало и составляет всего 2-3 дБ на 1000 км. Из этого следует, что электромагнитные волны могут преодолевать значительные расстояния, отражаясь от стенок волновода Земля – ионосфера. Характеристики распространения волн в упомянутом волноводе зависят от состояния нижней ионосферы. Особенно сильно сказывается прохождение терминатора через область наблюдения. Поэтому изменения в характере распространения ЭМ-волн могут быть индикатором тех или иных вариаций, проходящих в нижней ионосфере.

Из сказанного выше следует, что изучение механизмов распространения и генерации ЭМ-волн СНЧ/ОНЧ-диапазона является важной задачей геофизики и имеет большую ценность для ряда прикладных задач. Для решения упомянутых выше и многих других задач в Полярном геофизическом институте разработан трехкомпонентный регистратор СНЧ/ОНЧ-излучений с прецизионной привязкой к мировому времени и изготовлено несколько его экземпляров. В настоящее время на обсерваториях ПГИ в Ловозеро, Верхнетуломском и Баренцбург размещены стационарные комплекты для регистрации электромагнитных волн в диапазоне частот 30 Гц – 15 кГц. Обсерватория Баренцбург является единственной в мире точкой регистрации ОНЧ-излучений, находящейся в области полярной шапки. Также изготовлены мобильные комплекты с аналогичными характеристиками, которые могут быть развернуты практически в любом месте за короткое время. Ниже рассмотрены конструкция регистратора и его отличительные особенности.

### **Описание регистратора**

Регистратор СНЧ/ОНЧ-излучений представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из компьютера, антенн, предусилителей и блока, состоящего из АЦП, микроконтроллера и GPS/GLONASS-приёмника.

Для регистрации горизонтальных компонент магнитного поля используются рамочные антенны, чувствительные к той компоненте поля, которая ортогональна плоскости рамки. Для регистрации вертикальной компоненты электрического поля используется антенна, которая представляет собой вертикальный диполь – шар, находящийся на некоторой заданной высоте над землей. В месте установки антенн развернута система противовесов, представляющая собой набор проводов длиной в 2-3 раза больше высоты антенны, растягиваемых радиально от ее мачты. Такая “искусственная земля” значительно ослабляет влияние мелких неровностей земной поверхности и возможных локальных неоднородностей проводимости на результаты измерений. Блок-схема регистратора представлена на рис.1.

Основой регистратора ОНЧ-излучений является блок АЦП. В состав блока входит микроконтроллер, 24-битные аналого-цифровые преобразователи и гальванически развязывающие микросхемы. Блок АЦП оцифровывает аналоговые данные с частотой 32 кГц. Полоса частот сигнала, которую способен зарегистрировать прибор, составляет 0.03-15 кГц. Разрядность АЦП позволяет обеспечить весьма широкий динамический диапазон – до 115.5 дБ. Оцифрованные данные передаются на компьютер через интерфейс Ethernet.

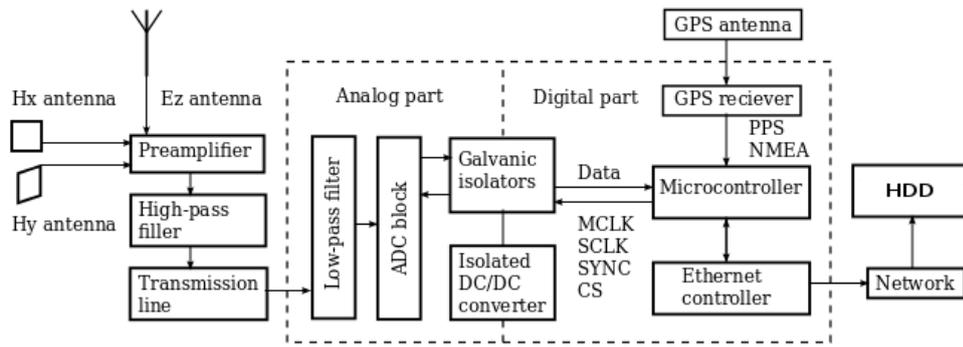


Рис.1. Функциональная схема регистратора компонент поля СНЧ/ОНЧ-излучений

Регистратор ОНЧ-излучений обладает прецизионной привязкой ко времени. Максимальное отклонение времени, записываемого в регистраторе, от мирового времени составляет не больше одной микросекунды. Для поддержания актуального времени в микроконтроллере реализован секундный таймер, который постоянно сверяется со временем, получаемым из GPS-приёмника.

При регистрации атмосферных шумов волновода Земля – ионосфера доминирующим источником помех, наводимых на магнитные и электрические антенны, является электромагнитное поле от местных линий электропередач. При этом гармоники наводимой помехи могут распространяться до нескольких килогерц, а их мощность может быть на несколько порядков выше, чем мощность природных ОНЧ-сигналов.

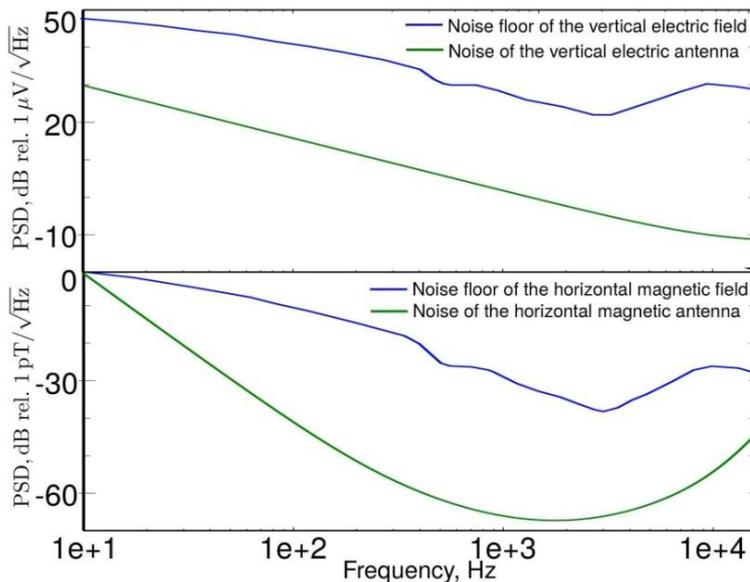


Рис.2. Оценка спектральной плотности собственных шумов регистратора ОНЧ-излучений

В некоторых случаях помехи, наведенные линиями передач, могут быть отслежены и подавлены при постобработке данных, но это возможно лишь при условии, что помехи не приводят к перегрузке усилительного тракта. Благодаря широкому динамическому диапазону АЦП это условие выполняется. Помимо этого, для минимизации воздействия сетевой помехи электрическая и магнитные антенны размещены вдали от ее источников, в то время как система сбора (вследствие эксплуатационных особенностей) размещена в помещении. С той же целью применяется гальваническое разделение цепей приборов и сети питания этих приборов. Предусилитель располагается рядом с антенной, что позволяет обеспечить согласование импедансов антенны и входного каскада, а также обеспечивает низкий уровень шума и малый уровень резистивных помех на длине кабеля, соединяющего антенну с усилителем.

На рисунке 2 приведены результаты оценки спектральной плотности собственных шумов регистратора ОНЧ-излучений. Синяя линия представляет среднестатистический спектр вертикальной электрической (вверху) и горизонтальной магнитной (внизу) компонент естественного шума волновода Земля – ионосфера. Зеленая – шумы регистратора вертикальной электрической компоненты ОНЧ-излучений (вверху) и регистратора горизонтальной магнитной компоненты (внизу). Среднестатистический спектр компоненты  $E_z$  естественного шума волновода Земля – ионосфера в СНЧ/ОНЧ-диапазоне как минимум на 20 дБ превышает расчетные собственные шумы вертикальной активной электрической антенны, а среднестатистический спектр компонент  $H_x$  и  $H_y$  естественного шума превышает собственные шумы горизонтальной магнитной антенны вместе с предусилителем не менее чем на 20 дБ в диапазоне частот от 30 Гц до 15 кГц. Отсюда следует, что данный ОНЧ-приемник позволяет уверенно регистрировать электромагнитные возмущения в СНЧ- и ОНЧ-диапазонах.

### **Отличительные особенности регистратора**

Регистратор ОНЧ-излучений обладает двумя отличительными особенностями, благодаря которым в работах по изучению естественных и искусственных сигналов ОНЧ-диапазона были сделаны важные практические выводы. Далее рассмотрена каждая из них.

#### ***Возможность регистрации вертикальной компоненты электрического поля***

Как говорилось выше, с помощью данного ОНЧ-приемника возможна регистрация вертикальной компоненты электрического поля ОНЧ-излучений. Наличие двух горизонтальных и вертикальной компонент поля позволяет определить направление прихода электромагнитных волн, исключая неопределенность в  $180^\circ$ . Например, в работе [1] исследован всплеск естественных ОНЧ-шипений в нетипично высокой полосе частот – порядка 4-10 кГц, зарегистрированный в авроральных широтах ( $L \sim 5.5$ ) на финской ст. Каннуслехта (вблизи обс. Соданкюля) и российской обс. Ловозеро, расположенной в  $\sim 400$  км к востоку. С помощью полученных данных об азимутальных углах прихода ЭМ-волн было выявлено, что в обеих точках ОНЧ-излучения приходили к точке наблюдений с юго-востока, а также сделан вывод, согласно которому, несмотря на то что всплеск ОНЧ-шипений совпал по времени с развитием суббури и появлением в зените станции ярких полярных

сияний, перемещающихся с севера, возбуждение ОНЧ-шипений не связано с сияниями. Финский регистратор располагает только горизонтальными магнитными датчиками [2], поэтому рассчитать азимутальные углы прихода волн без неопределенности  $180^\circ$ , пользуясь полученными с помощью этого регистратора данными, невозможно.

Наличие вертикальной электрической антенны также позволяет определять структуру регистрируемого поля, а именно оценивать модовый состав сигналов, распространяющихся от ионосферного источника. В работе [3] рассмотрены механизмы распространения сигнала низкочастотного ионосферного источника, образованного в результате эксперимента по нагреву ионосферы. В результате высказано предположение, что в данном эксперименте на частоте 1017 Гц, лежащей ниже частоты поперечного резонанса волновода Земля – ионосфера, сигнал распространяется на ТЕМ-моду. В пользу этого предположения свидетельствует линейная поляризация сигнала и постоянное в течение двух часов отношение  $E_z/H$ . Расчеты показали, что рассчитанный азимутальный угол прихода данного сигнала незначительно отличается от реального угла ( $3-5^\circ$ ). Иная картина наблюдается на частоте 3017 Гц, где могут сосуществовать три моды: ТЕМ, ТЕ01 и ТМ01. Радиальная компонента магнитного поля на этой частоте значительно больше, чем на частоте 1017 Гц. Отношение  $E_z/H$  меньше, чем на 1017 Гц, но все же больше ожидаемых для ТМ-моды значений 0.5-0.7, по-видимому, из-за преобладающего вклада ТЕМ-моды в  $H$ , по сравнению с ТМ. Из-за вклада ТЕ-моды направление вектора Пойнтинга не совпадает с обратным азимутом источника, отличаясь от него примерно на  $20-40^\circ$ . Этот факт заставляет с осторожностью относиться к оценкам углов прихода при анализе естественных ОНЧ-излучений.

### ***Прецизионная привязка к мировому времени***

Прецизионная привязка к мировому времени расширяет диапазон задач, которые можно решать с помощью данного ОНЧ-приемника.

В международном эксперименте по нагреву высокоширотной ионосферы стендом EISCAT/Heating (Северная Норвегия) двумя пространственно разнесенными КВ-передатчиками, излучающими на близких частотах, впервые обнаружено и исследовано явление доплеровского сдвига частоты, наблюдаемого на земной поверхности сигнала относительно разности частот передатчиков [4]. Показано, что причиной наблюдаемых изменений частоты является зональный ветер в  $D$ -области ионосферы. Результаты такого рода могут быть получены, если записывающая аппаратура позволяет непрерывно контролировать и учитывать изменения частоты дискретизации АЦП, поскольку величина доплеровского сдвига частоты регистрируемого сигнала по порядку величины совпадает с возможными изменениями частоты дискретизации.

Благодаря точной привязке ко времени с помощью данного регистратора есть возможность расчета фаз сигналов СДВ-передатчиков для диагностики состояния  $D$ -слоя ионосферы в пространственно разнесенных точках. В рабочий интервал частот приемника (30 Гц – 15 кГц) входят частоты передатчиков радионавигационной системы “Альфа”. Были проведены наблюдения фаз сигнала краснодарского передатчика этой системы на частоте 12649 Гц в точках регистрации ОНЧ-излучений, расположенных в обсерваториях Ловозеро (LOZ) и Баренцбург (BAB), во время солнечного затмения 20 марта 2015 г.

На рисунке 3 представлены результаты наблюдений. Во время затмения (07:40-11:50 UT) в Баренцбурге наблюдается уменьшение фазы (красная сплошная линия), причем минимум приходится на время максимальной фазы затмения, наблюдаемой на архипелаге Шпицберген  $\sim 10:10-10:13$  UT (обозначено черным крестиком). Анализ фазы сигнала передатчика в obs. Ловозеро показал, что ее уменьшение также наблюдается во время затмения (синяя сплошная линия), но, поскольку в этой точке размер наблюдаемой максимальной фазы затмения был меньше, изменение фазы сигнала передатчика составляет небольшое значение.

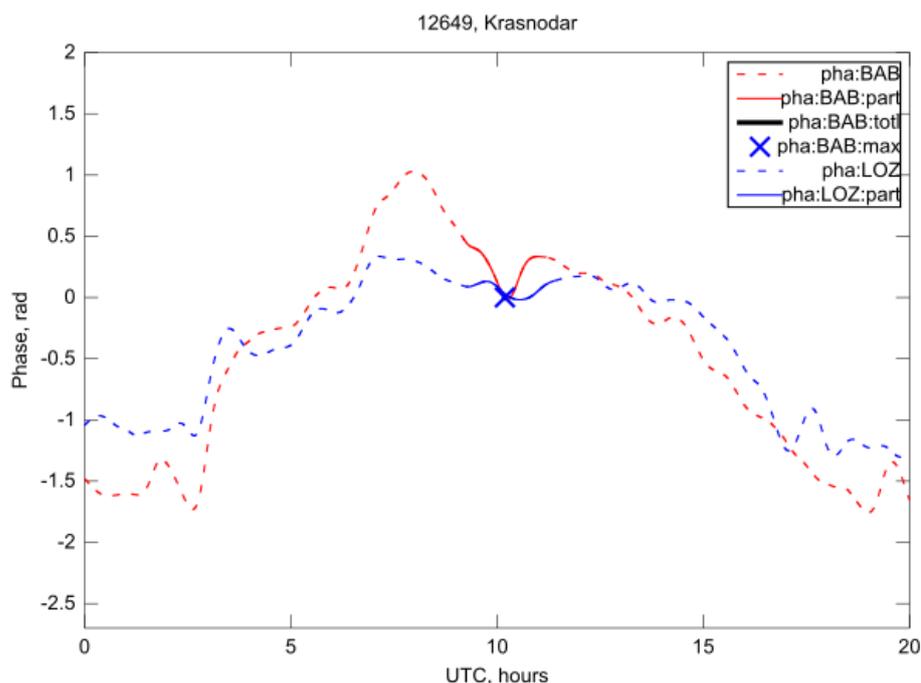


Рис.3. Фаза сигнала краснодарского передатчика радионавигационной системы "Альфа", наблюдаемая в обсерваториях Баренцбург (красная линия) и Ловозеро (синяя линия)

### Заключение

В работе описан трехкомпонентный регистратор СНЧ/ОНЧ-полей на земной поверхности, разработанный в Полярном геофизическом институте. Технические характеристики регистратора отвечают современным требованиям к приборам, применяемым для изучения геофизических полей и физических механизмов распространения радиоволн. Особенности приемника, такие как прецизионная привязка ко времени, возможность измерения вертикальной электрической компоненты поля СНЧ/ОНЧ-сигналов, обеспечение широкого динамического диапазона, позволяют решать широкий спектр задач. Использование этого прибора в сети геофизических станций позволяет, например, решить такие задачи, как измерение пространственной когерентности сигналов и на основе этих измерений судить о пространственной структуре источников.

## **Литература**

1. Условия в солнечном ветре и магнитосфере во время всплеска нетипичных ОНЧ-шипений (08 декабря 2013 г.) / Н. Г. Клейменова, Ю. Маннинен, Л. И. Громова, Т. Турунен, Ю. В. Федоренко, А. С. Никитенко, Н. Р. Зелинский, С. В. Громов // Геомagnetизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 3. С. 323.
2. Manninen J. Some aspects of ELF\_VLF emissions in geophysical research // Sodankyla Geophysical Observatory Publications. 2005. № 98. 177 p.
3. Ларченко А. В., Федоренко Ю. В., Пильгаев С. В. Результаты наблюдений излучения ОНЧ-диапазона при модификации ионосферы мощным модулированным КВ-излучением// Десятая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”: сб. тр. М.: ИКИ, 2015. С. 178.
4. Tereshchenko E. D., Shumilov O. I., Kasatkina E. A., Gomonov A. D. // Geophysical Research Letters. 2014. V.41(13). P. 4442-4448, doi:10.1002/2014GL060376.

## **Сведения об авторах**

### **Пильгаев Сергей Васильевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, serg\_apes@bk.ru

### **Ларченко Алексей Викторович,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, alexey.larchenko@gmail.com

### **Филатов Михаил Валерьевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mijgun@yandex.ru

### **Никитенко Александр Сергеевич,**

младший научный сотрудник, аспирант, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, alex.nikitenko91@gmail.com

### **Лебедь Ольга Михайловна,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты. olgamihsh@yandex.ru

### **Федоренко Юрий Валентинович,**

к.физ.-мат.н., доцент, заведующий сектором, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, yury.fedorenko@gmail.com

# ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГЕОФИЗИКЕ

УДК 519.626

О. И. Ахметов, И. В. Мингалев, О. В. Мингалев, Ю. В. Федоренко

## ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА НА ПРИМЕРЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ

### Аннотация

Рассматриваются результаты тестирования новой схемы на пространственно-двумерных аналитических решениях для источника в виде точечного гармонического электрического диполя Герца в бесконечной однородной изотропной среде, которая является либо диэлектриком, либо проводником. Показано, что дипольное поле в установившемся режиме с хорошей точностью воспроизводится в охватываемой областью моделирования части промежуточной (средней) зоны, а также в части дальней зоны.

### Ключевые слова:

*распространение электромагнитных волн в простых средах, численное моделирование, гармонический диполь Герца.*

O. I. Akhmetov, I. V. Mingalev, O. V. Mingalev, Yu. V. Fedorenko

## DIFFERENCE SCHEME FOR THE NUMERICAL SOLUTION OF MAXWELL'S EQUATIONS ON THE EXAMPLE OF HARMONIC ELECTRICAL DIPOLE

### Abstract

Test results of new difference scheme for the numerical solution of Maxwell's equations on spatial two dimensional analytical solution are presented for point source of field harmonic electrical Hertz dipole in infinite homogeneous isotropic medium, which is dielectric or conductor. The numerical solution is in good according to analytical dipole field in middle field and part of far field.

### Keywords:

*electromagnetic waves propagation in an ordinary medium, numerical modeling, harmonic Hertz dipole.*

### Введение

Начиная с 1994 г. за рубежом опубликовано большое число работ (см. обзоры [1, 2]), в которых для исследования распространения электромагнитных сигналов в нижнем диапазоне частот используются различные численные модели, основанные на методе конечных разностей во временной области. В нашей работе [3] предложена численная модель с учетом тензорной проводимости ионосферы, основанная на численном решении системы уравнений Максвелла с законом Ома при помощи новой явной двухслойной по времени разностной схемы. В этой схеме используется

новый подход к аппроксимации по времени, который основан на представлении уравнений Максвелла в интегральной по времени форме.

### Расчеты и результаты

В работе используются сферические координаты  $(r, \alpha, \beta)$  с центром в источнике и осью вдоль единичного вектора направления момента диполя  $\mathbf{v}$  ( $r=|\mathbf{x}|$ ,  $\beta$  – широта). Пусть  $\omega$ ,  $I_0$  и  $l$  – частота диполя, амплитуда тока и расстояние в нем,  $P_0 = I_0 l / (4\pi)$  – амплитуда момента диполя в системе СИ.

Тестовые расчеты выполняются следующим образом. Для имитации источника поле от аналитического решения при  $t \geq 0$  задается на сетке в шаре радиуса  $R_0$ , причем плавно включается за время  $t_0 = 10 \theta$ , где  $\theta = 2\pi/\omega$  – период диполя. То есть поле от аналитического решения умножается на множитель  $\eta(t/t_0)$  – достаточно гладкую неубывающую функцию, такую, что  $\eta(s) \equiv 0$  при  $s \leq 0$  и  $\eta(s) \equiv 1$  при  $s \geq 1$ . В сферическом слое  $\{R_0 < r < R_1\}$  поле рассчитывается путем численного решения уравнений Максвелла в однородной изотропной среде ( $\varepsilon \equiv \varepsilon_1 = \text{Const}$ ,  $\mu \equiv \mu_1 = \text{Const}$ ,  $\sigma = \text{Const}$ ):

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\text{rot} \mathbf{E}, \quad \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \text{rot} \mathbf{H} - \mathbf{j}, \quad \text{div} \mathbf{D} = \text{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}. \quad (1)$$

Для имитации неограниченного пространства (то есть для подавления численного отражения от границы) на границе области моделирования  $\{r = R_1\}$  используется вариант поглощающего слоя (UPML – uniaxial perfectly matched layer), когда поля рассчитываются на сетке в большем сферическом слое  $\{R_0 < r < R_2, R_2 > R_1\}$ . В поглощающем слое  $\{R_1 < r < R_2\}$  решаются уравнения (1) с возрастающими по  $r$  проницаемостями среды:

$$\varepsilon = \varepsilon(r) = \varepsilon_1 \left( 1 + \gamma \eta \left( \frac{(r - R_1)}{(R_2 - R_1)} \right) \right), \quad \mu = \mu(r) = \mu_1 \left( 1 + \gamma \eta \left( \frac{(r - R_1)}{(R_2 - R_1)} \right) \right),$$

где  $\gamma > 0$  – заданная постоянная, а функция  $\eta(s)$  описана выше. В представленных расчетах использовалось  $\gamma = 19$ , т. е. проницаемости увеличиваются в поглощающем слое в  $\gamma + 1 = 20$  раз. Это дает при  $r \rightarrow R_2$  замедление скорости волны  $a(r) = c / \sqrt{\varepsilon(r)\mu(r)}$  в 20 раз по сравнению со скоростью в области моделирования  $a_1 = c / \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$ , а также уменьшает в разы длину волны и приводит к уменьшению на каждом шаге величины распространяющихся в поглощающем слое полей. В результате в случае достаточно большого расстояния  $R_2 - R_1$  поля практически обращаются в 0 при  $r \rightarrow R_2$ , когда из-за односторонних разностей при вычислении пространственных производных на внешней границе поглощающего слоя  $\{r = R_2\}$  возникает численное отражение.

В случае диэлектрика ( $\sigma = 0$ ) дипольное аналитическое решение является точным решением уравнений Максвелла и в системе СИ имеет вид:

$$\mathbf{A}(r, \beta, t) = \frac{P \mathbf{v}}{r} e^{i(\omega t - kr)}, \quad \mathbf{H}(r, \beta, t) = \text{rot} \mathbf{A}(r, \beta, t) = \frac{P [\mathbf{v} \times \mathbf{x}]}{r^3} (1 + ikr) e^{i(\omega t - kr)}, \quad (2)$$

$$\mathbf{E}(r, \beta, t) = \frac{\text{rot} \mathbf{H}(r, \beta, t)}{i \omega \varepsilon \varepsilon_0} = \frac{e^{i(\omega t - kr)}}{i \omega \varepsilon \varepsilon_0 r^3} \left( (k^2 r^2 - 1 - ikr) \mathbf{v} + \frac{(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \mathbf{x}}{r^2} (3 + 3ikr - k^2 r^2) \right), \quad (3)$$

где волновое число  $k = k_0(\omega) = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} / c \in \square$ . Размеры области моделирования и поглощающего слоя были  $R_1 = 4.3\lambda$ ,  $R_2 = 4.8\lambda$ , где  $\lambda = 2\pi/k$  – длина волны. Шаги пространственной сетки составляли  $\Delta r = \lambda / N_\lambda = \lambda/160$  и  $\Delta\beta = \pi / N_\beta = \pi/360$  рад = 0.5 град., т. е. число шагов было  $N_r = 768$ ,  $N_\beta = 360$  и на поглощающий слой приходится 80 шагов по  $r$ . Шаг по времени  $\tau$  должен удовлетворять условию Куранта (сеточная скорость  $V_h$  больше скорости света в среде  $a_1$ ), которое в рассматриваемом случае удобно представить в виде:

$$\min V_h = \min\left(\left(R_0 \Delta\beta / \tau\right); \left(\Delta r / \tau\right)\right) > a_1 = c / \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}. \quad (4)$$

Рассматривались два варианта значения  $R_0$  и шага по времени  $\tau = \theta / N_\theta$ :  $R_{01} = 0.5\lambda$ ,  $\tau_1 = \theta/720$ ,  $N_{\theta 1} = 720$  и  $R_{02} = 1.5\lambda$ ,  $\tau_2 = \theta/360$ ,  $N_{\theta 2} = 360$ .

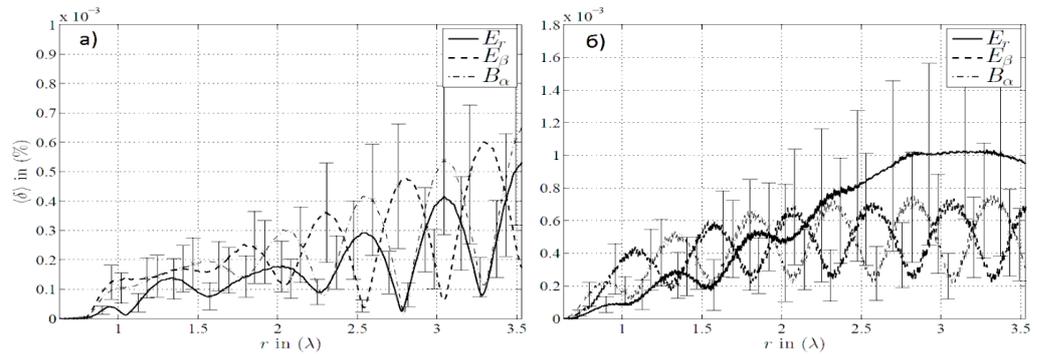


Рис. 1. Зависимость для каждой компоненты поля рассчитанной по формуле (5) усредненной установившейся относительной ошибки  $\langle \delta_F(r, \beta = 0) \rangle$  от  $r$  в плоскости поперек диполя  $\{\beta = 0\}$ : слева а – при  $R_{02} = 1.5\lambda$ ,  $\tau_2 = \theta/360$  и справа б – при  $R_{01} = 0.5\lambda$ ,  $\tau_1 = \theta/720$

На рисунке 1 для присутствующих компонент поля  $E_r$ ,  $E_\beta$ ,  $B_\alpha$  представлены оценки зависимости от расстояния  $r$  до источника усредненной установившейся относительной ошибки  $\langle \delta_F(r, \beta = 0) \rangle$  численного решения  $F_h(r_p, \beta = 0, t_k)$  по сравнению с аналитическим решением  $F_a(r_p, \beta = 0, t_k)$  в плоскости поперек диполя  $\{\beta = 0\}$ , (где  $F = E_r, E_\beta, B_\alpha$ ,  $r_p = p\Delta r$ ,  $t_k = k\tau$ ), которая рассчитывалась по формуле:

$$\langle \delta_F(r_p, \beta = 0) \rangle = \left( \sum_{k=k_1+1}^{k_1+K} |F_h(r_p, \beta = 0, t_k) - F_a(r_p, \beta = 0, t_k)| \right) / \left( \sum_{k=k_1+1}^{k_1+K} |F_a(r_p, \beta = 0, t_k)| \right). \quad (5)$$

Усреднение (в установившемся режиме) проводилось по интервалу  $[T_1; T_2]$ , где  $T_1 = 700\theta$  и  $T_2 = 1900\theta$ , т. е.  $k_1 = 700 N_\theta$ ,  $K = 1200 N_\theta$ . На рис.1а представлены результаты для  $R_{02} = 1.5\lambda$ ,  $\tau_2 = \theta/360$ , а на рис.1б при  $R_{01} = 0.5\lambda$ ,  $\tau_1 = \theta/720$ . Видно, что размер  $R_0$  окрестности источника, в которой задается аналитическое решение, оказывает влияние на величину ошибки: для меньшего  $R_{01}$  ошибка больше, чем для  $R_{02}$ , несмотря на меньший шаг по времени.

На рисунке 2 показана зависимость от времени специальным образом усредненной по радиусу на кольце  $2\lambda < r < 3.5\lambda$  относительной ошибки, которая рассчитывалась по формуле:

$$\langle \delta_F(t_k) \rangle = \max_{\beta_s} \left( \sum_{p=p_1+1}^{p_1+P} |F_h(r_p, \beta_s, t_k) - F_a(r_p, \beta_s, t_k)| \right) / \left( \sum_{p=p_1+1}^{p_1+P} |F_a(r_p, \beta_s, t_k)| \right). \quad (6)$$

На рис.2а приведена зависимость при  $t > 20\theta$ , а на рис.2б в удобном масштабе при  $t > 300\theta$  показан конец переходного периода и установившийся режим.

В случае проводника ( $\varepsilon \equiv \varepsilon_1 = \text{Const}$ ,  $\mu \equiv \mu_1 = \text{Const}$ ,  $\sigma \equiv \text{Const} > 0$ ) удобно ввести частоту проводимости  $\omega_\sigma = \sigma / (\varepsilon \varepsilon_0)$  и толщину скин-слоя  $\delta_0(\omega) = \sqrt{2 / (\mu_1 \mu_0 \omega \sigma)} = a_1 \sqrt{2 / (\omega \omega_\sigma)}$ .

Дипольное аналитическое решение является точным решением уравнений Максвелла в низкочастотном пределе  $\omega_\sigma \ll \omega$  (без учета тока смещения), т. е. является приближенным решением полных уравнений Максвелла (1). Для него магнитное поле определяется формулами (2), а электрическое поле имеет вид:

$$\mathbf{E}(r, \beta, t) = \frac{\text{rot } \mathbf{H}(r, \beta, t)}{\sigma} = \frac{e^{i(\omega t - kr)}}{\sigma r^3} \left( (k^2 r^2 - 1 - ikr) \mathbf{v} + \frac{(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \mathbf{x}}{r^2} (3 + 3ikr - k^2 r^2) \right), \quad (7)$$

причем волновое число является комплексным:  $k = k(\omega) = (1 - i) / \delta_0(\omega) \in \mathbb{C}$ .

Длина волны определяется как  $\lambda(\omega) = 2\pi / \text{Re}k(\omega) = 2\pi \delta_0(\omega)$ . Шаги пространственной сетки составляли  $\Delta r = \lambda / N_\lambda = \lambda / 100$  и  $\Delta \beta = \pi / N_\beta = \pi / 360$  рад = 0.5 град., размер  $R_0$  окрестности источника, в которой задается аналитическое решение, был  $R_0 = \lambda$ . Размеры области моделирования и поглощающего слоя были  $R_1 = 4.6\lambda$ ,  $R_2 = 5.4\lambda$ , т. е. на поглощающий слой также приходится 80 шагов по  $r$ . Значение проводимости определялось из условия  $\omega_\sigma = 512\omega$ . Отметим, что шаг по времени  $\tau$  должен удовлетворять как условию Куранта (4), так и условию аппроксимации затухания  $\tau \omega_\sigma \approx 0.1$ . Были проверены 2 варианта шагов по времени:  $\tau_1 = \theta / 8000$  и  $\tau_2 = 0.25 \tau_1 = \theta / 32000$ .

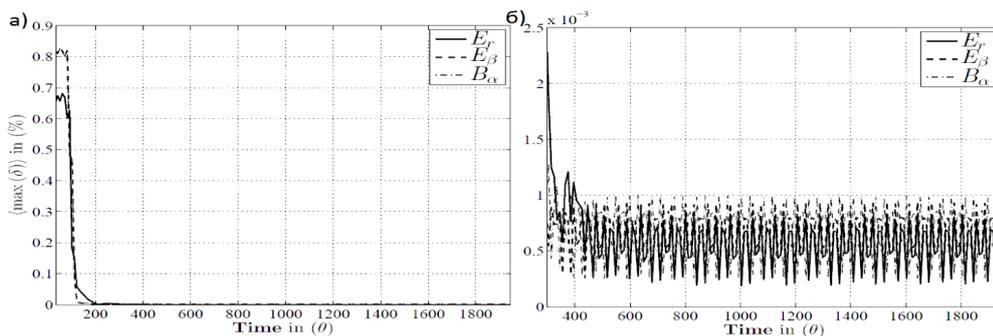


Рис.2. Зависимость от времени рассчитанной по формуле (6) усредненной по радиусу относительной ошибки  $\langle \delta_F(t) \rangle$ .

Слева на панели а – приведена зависимость при  $t > 200$ , а справа на панели б – при  $t > 3000$  в удобном масштабе показан конец переходного периода и установившийся режим

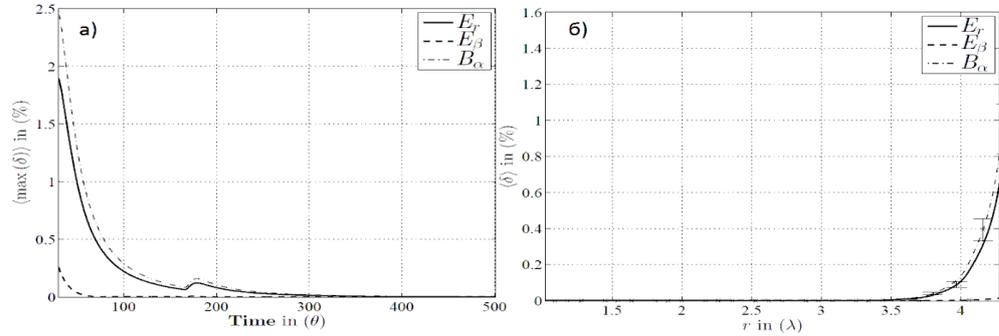


Рис.3. Тест для проводника при шаге по времени  $\tau_1 = \theta/8000$ . Слева а – зависимость от времени рассчитанной по формуле (6) усредненной по радиусу относительной ошибки  $\langle \delta_F(t) \rangle$ ; справа б – зависимость от  $r$  рассчитанной по формуле (5) усредненной установившейся относительной ошибки  $\langle \delta_F(r, \beta = 0) \rangle$  в плоскости поперек диполя  $\{\beta=0\}$ . Усреднение проводилось по интервалу  $[3500; 5000]$  (в установившемся режиме)

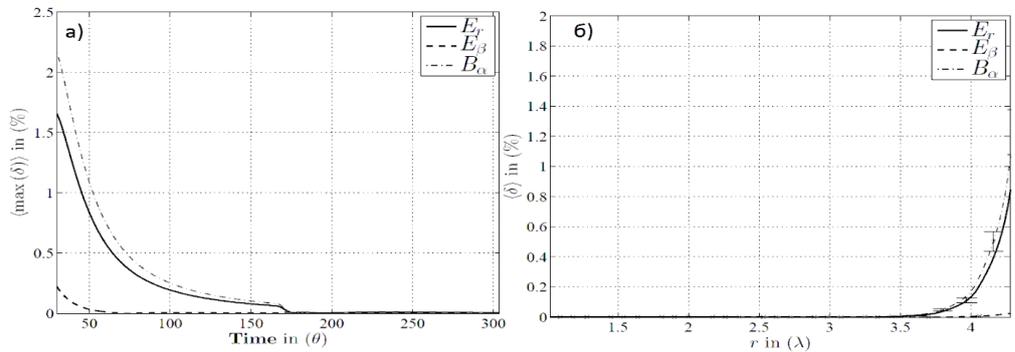


Рис.4. Тест для проводника при шаге по времени  $\tau_2 = \theta/32000$ . Обозначения такие же, как и на рис.3

На рис.3 приведены результаты теста для проводника при шаге по времени  $\tau_1 = \theta/8000$ . На рис.3а показана зависимость от времени рассчитанной по формуле (6) усредненной по радиусу относительной ошибки  $\langle \delta_F(t) \rangle$ , на рис.3б показана зависимость от  $r$  рассчитанной по формуле (5) усредненной установившейся относительной ошибки  $\langle \delta_F(r, \beta = 0) \rangle$  в плоскости поперек диполя  $\{\beta=0\}$ . Усреднение проводилось по интервалу  $[3500; 5000]$

(в установившемся режиме). На рис. 4 приведены аналогичные результаты для в 4 раза меньшего шага по времени  $\tau_2 = \theta/32000$ . Видно, что уменьшение шага по времени существенно сокращает время установления ( $\approx 3000 \rightarrow \approx 1750$ ), но мало меняет усредненную установившуюся относительную ошибку  $\langle \delta_F(r, \beta = 0) \rangle$ .

### **Заключение**

На основании проведенных тестов можно сделать следующие выводы.

1. Окрестность источника, в которой поле задано по формулам аналитического решения, должна быть достаточно большой  $R_0 \geq 0.5\lambda$ , т. е. содержать ближнюю зону  $\{r < 0.1114\lambda\}$  и часть промежуточной (средней) зоны  $\{0.1114\lambda < r < 1.114\lambda\}$ .
2. Дипольное поле в установившемся режиме с хорошей точностью воспроизводится в охватываемой областью моделирования  $\{R_0 < r < R_1\}$  части промежуточной (средней) зоны, а также в части дальней зоны  $\{1.114\lambda \leq r \leq 3.5\lambda\}$ . Нарастание относительной ошибки при  $\{r \geq 3.5\lambda\}$  обусловлено тем, что из-за быстрого убывания по пространству аналитического решения в этой области оно становится очень малым, так что даже при использовании двойной точности в представлениях вещественных чисел даже очень малые ошибки округления сравнимы с точным решением.

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-00063.

### **Литература**

1. Simpson J. J. Current and future applications of 3-D global Earth-ionospheric models based on the full-vector Maxwell's equations FDTD method // *Surveys Geophys.* 2009. Vol. 30. P. 105-130, doi 10.1007/s10712-009-9063-5.
2. Simpson J. J., Taflove A. A review of progress in FDTD Maxwell's equations modeling of impulsive subionospheric propagation below 300 kHz // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 2007. Vol. 55. No. 6. P. 1582-1590, doi 10.1109/TAP.2007.897138.
3. Две разностные схемы для численного решения уравнений Максвелла для ультра и сверхнизкочастотных сигналов в волноводе Земля – ионосфера О. И. Ахметов, В. С. Мингалев, И. В. Мингалев и др // *Журнал вычислительной математики и математической физики.* 2014. Т. 54, № 10. С. 1656-1677.

### **Сведения об авторах**

#### **Ахметов Олег Иршагович,**

к.физ.-мат.н., научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, akhmetov@pgia.ru

#### **Мингалев Игорь Викторович,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mingalev\_i@pgia.ru

#### **Мингалев Олег Викторович,**

к.физ.-мат.н., и.о. заведующего сектором № 203, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, mingalev\_o@pgia.ru

**Федоренко Юрий Валентинович,**

к.физ.-мат.н., доцент, заведующий сектором, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, yury.fedorenko@gmail.com

УДК 537.87, 517.958

**М. Н. Мельник, О. И. Ахметов, О. В. Мингалев, И. В. Мингалев**

**ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА  
ДЛЯ ТОЧЕЧНОГО ДИПОЛЬНОГО ИСТОЧНИКА  
В ОДНОРОДНОМ ИЗОТРОПНОМ ПРОВОДНИКЕ  
И НА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕ ДВУХ ОДНОРОДНЫХ ИЗОТРОПНЫХ СРЕД**

**Аннотация**

Выведена формула, описывающая решение задачи Коши для телеграфного уравнения в 3-мерном пространстве, аналогичная (и переходящая в нее при нулевой проводимости) формуле Кирхгофа для волнового уравнения. На основе выведенной формулы строится решение задачи о поле электрического диполя Герца с произвольной зависимостью тока от времени в бесконечном однородном изотропном проводнике. Также для случая гармонически зависящих от времени полей получено в наиболее общем случае точное решение задачи о поле горизонтального электрического диполя Герца на плоской границе раздела двух однородных изотропных сред, из которых одна обязательно является проводником.

**Ключевые слова:**

*уравнения Максвелла в проводнике, точные решения, диполь Герца.*

**M. N. Melnik, O. I. Akhmetov, O. V. Mingalev, I. V. Mingalev**

**EXACT SOLUTIONS OF MAXWELL EQUATION FOR  
A POINT DIPOLE SOURCE IN A HOMOGENEOUS ISOTROPIC  
CONDUCTOR AND ON PLANE BOUNDARY  
OF TWO HOMOGENEOUS ISOTROPIC MEDIA**

**Annotation**

In this paper a formula has been obtained that describes the solution to the Cauchy problem for the telegraph equation in a three-dimensional space, which is similar to Kirchhoff formula for the wave equation. In the case of zero conductivity this formula transforms to Kirchhoff formula. Based on the derived formula the solution for the problem of the field of the electric Hertz dipole with an arbitrary time dependence of the current in an infinite homogeneous isotropic conductor has been received. Also, for the case of harmonic time-dependent fields an exact solution has been obtained for the problem of the field of the horizontal electric Hertz dipole located on a plane boundary of two homogeneous isotropic media, one of which is necessarily a conductor.

**Keywords:**

*Maxwell equations in conductor, exact solutions, Hertz dipole.*

**Введение**

Точные решения уравнений Максвелла для полей от искусственных источников в однородных изотропных средах имеют большое прикладное значение, в том числе для разработки и тестирования методов численного решения уравнений Максвелла. Особенно важны решения

с распространяющимся в пространстве фронтом. Такие задачи в однородном изотропном проводнике сводятся к задаче Коши для 3-мерного телеграфного уравнения для векторного потенциала с нулевыми начальными условиями. Для телеграфного оператора известно фундаментальное решение (функция Грина, например, без доказательства приведено в [1]), но до настоящего времени не была выведена формула, которая описывает решение задачи Коши аналогично формуле Кирхгофа для волнового уравнения. В этой работе мы выводим эту формулу и с её помощью получаем решение задачи о поле электрического диполя Герца, который включается на конечное время и имеет произвольную зависимость от времени тока в диполе.

Также для тестирования численных моделей распространения сигнала в волноводе Земля – ионосфера важны точные решения (во всем пространстве) для случая поля от источника, расположенного на плоской границе между двумя различными однородными бесконечными средами. Наилучшим примером является задача о поле гармонического по времени горизонтального электрического диполя Герца, который расположен на плоской границе раздела двух однородных изотропных сред, из которых одна обязательно является проводником, а вторая может быть как проводником, так и диэлектриком [1-5]. До настоящего времени у этой задачи было известно только приближенное решение в низкочастотном пределе (без учета тока смещения) для случая сред с одинаковой магнитной проницаемостью. В этой работе мы приводим точное решение этой задачи для общего случая.

### **Постановка задачи нахождения электромагнитного поля от заданного нестационарного сингулярного источника внешнего тока и вывод уравнения баланса заряда**

Пусть однородный изотропный проводник с проводимостью  $\sigma$ , относительными проницаемостями диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  занимает область  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$  в пространстве  $\mathbb{R}^3$ , в которой задан сингулярный источник тока  $\mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t)$  — сингулярная обобщенная функция, у которой носитель по  $\mathbf{x}$   $\text{supp} \mathbf{j}^{(s)} \subset \Omega$  является либо конечным множеством точек, либо ограниченной кривой, либо ограниченной поверхностью. Обозначим через  $\mathcal{D}'(\Omega \times [t^0; T])$  пространство обычных обобщенных функций в случае ограниченной области  $\Omega$  и пространство обобщенных функций медленного роста по  $\mathbf{x}$  в случае неограниченной области  $\Omega$  (см. [6]). Обозначим через  $\rho^{(s)}(\mathbf{x}, t)$  плотность заряда в источнике, которая является сингулярной обобщенной функцией с тем же носителем  $\text{supp} \mathbf{j}^{(s)} \subset \Omega$  по  $\mathbf{x}$ . Подчеркнем, что эта функция заранее не известна и должна быть выражена через заданную плотность тока  $\mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t)$  – входной параметр задачи. Через  $\rho_\sigma(\mathbf{x}, t)$  и  $\mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x}, t)$  обозначим соответственно пространственные плотности заряда и тока вне источника, которые должны быть непрерывны по  $\mathbf{x}$  в области  $\Omega \setminus \text{supp} \mathbf{j}^{(s)}$ .

Уравнения Максвелла в системе СИ ( $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные) будем рассматривать как в смысле обобщенных функций из пространства  $\mathcal{D}'(\Omega \times [t^0; T])$ , так и в классическом смысле вне источника, т. е. электромагнитное поле вне источника будем считать достаточно гладким, из класса функций  $C^1((\Omega \setminus \text{supp } \mathbf{j}^{(s)}) \times [t^0; T])$ . Закон Ома в однородном изотропном проводнике имеет вид:

$$\mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma \mathbf{E}(\mathbf{x}, t), \quad (1.1)$$

материальные уравнения имеют вид:

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}, t) = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \mu \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{x}, t), \quad (1.2)$$

а уравнение Гаусса и уравнение Фарадея имеют, соответственно, вид:

$$\text{div } \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\text{rot } \mathbf{E}(\mathbf{x}, t). \quad (1.4)$$

Уравнение Пуассона имеет вид:

$$\text{div } \mathbf{D}(\mathbf{x}, t) = \rho_\sigma(\mathbf{x}, t) + \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t), \quad (1.5)$$

Уравнение Максвелла можно записать в форме:

$$\text{rot } \mathbf{H}(\mathbf{x}, t) - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x}, t) + \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t). \quad (1.6)$$

Получим уравнение баланса заряда, которое позволяет выразить плотность заряда в источнике  $\rho^{(s)}(\mathbf{x}, t)$  и в пространстве  $\rho_\sigma(\mathbf{x}, t)$  через входные параметры задачи – начальные условия и плотность тока в источнике. Обозначим через  $\omega_\sigma = \sigma / (\varepsilon \varepsilon_0)$  частоту проводимости в системе СИ. Взятие  $\text{div}$  от уравнения (1.1) с учетом 1-го уравнения в (1.2) и уравнения (1.5) дает цепочку равенств:

$$\text{div } \mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma \text{div } \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \omega_\sigma (\rho_\sigma(\mathbf{x}, t) + \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t)). \quad (1.7)$$

Взятие  $\text{div}$  от уравнения (1.6) с учетом уравнений (1.3) и (1.7) дает уравнение баланса заряда:

$$\frac{\partial \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_\sigma(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_\sigma \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t) + \omega_\sigma \rho_\sigma(\mathbf{x}, t) + \text{div } \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t) = 0. \quad (1.8)$$

Поскольку пространственная плотность заряда вне источника  $\rho_\sigma$  непрерывна по  $\mathbf{x}$  в области  $\Omega \setminus \text{supp } \mathbf{j}^{(s)}$ , а  $\rho^{(s)}$  и  $\mathbf{j}^{(s)}$  являются сингулярными обобщенными функциями с носителем  $\text{supp } \mathbf{j}^{(s)}$  по  $\mathbf{x}$ , последнее уравнение равносильно следующим отдельным уравнениям баланса заряда в пространстве и источнике:

$$\frac{\partial \rho_{\sigma}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_{\sigma} \rho_{\sigma}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_{\sigma} \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t) + \operatorname{div} \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t) = 0. \quad (1.10)$$

Эти уравнения относительно плотности заряда являются по переменной  $t$  обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями 1-го порядка с постоянным коэффициентом. Решение этих уравнений описывается формулой Коши, применение которой дает следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\sigma}(\mathbf{x}, t) &= e^{-\omega_{\sigma}(t-t^0)} \rho_{\sigma}(\mathbf{x}, t^0), \\ \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t) &= e^{-\omega_{\sigma}(t-t^0)} \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t^0) - e^{-\omega_{\sigma}t} \int_{t^0}^t e^{\omega_{\sigma}\theta} \operatorname{div} \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, \theta) d\theta. \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

Первая формула хорошо известна и описывает экспоненциальное по времени затухание пространственной плотности заряда в проводнике. Вторая формула показывает, что проводимость среды существенно влияет на баланс заряда в источнике.

Отметим, что искать как аналитические, так и численные решения напрямую для системы уравнений (1.1)-(1.6), (1.11) невозможно, поскольку она состоит из взаимно зацепляющихся уравнений. Поэтому для получения решений необходимо использовать потенциалы и свести систему (1.1)-(1.6), (1.11) к отдельному уравнению для векторного потенциала.

### Оптимальная калибровка и телеграфные уравнения для потенциалов в случае проводника

Обозначим через  $c_0 = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$  и  $c = c_0/\sqrt{\varepsilon \mu}$  соответственно скорость света в вакууме и в среде. Рассмотрим уравнения для потенциалов, которые в системе СИ вводятся соотношениями

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \operatorname{rot} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = -\nabla \varphi(\mathbf{x}, t) - \frac{\partial \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)}{\partial t}. \quad (2.1)$$

Для дальнейшего изложения введем линейные волновой  $L_w$  и телеграфный

$L_T$  операторы, которые действуют по формулам:

$$L_w u(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \Delta u, \quad L_T u(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \omega_{\sigma} \frac{\partial u}{\partial t} - c^2 \Delta u, \quad \omega_{\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta = \operatorname{div} \nabla$  – оператор Лапласа. Подстановка уравнений (2.1) в уравнение Пуассона (1.5) с учетом уравнений (1.2) дает уравнение для скалярного потенциала, которое в смысле обобщенных функций, т. е. в пространстве  $\mathcal{D}'(\Omega \times [t^0; T])$ , имеет вид:

$$L_T \varphi(\mathbf{x}, t) = \frac{c^2}{\varepsilon \varepsilon_0} \left( \rho_\sigma(\mathbf{x}, t) + \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t) \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_\sigma \varphi(\mathbf{x}, t) + c^2 \operatorname{div} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \right), \quad (2.3)$$

а в классическом смысле, т. е. поточечно при  $\mathbf{x} \in \Omega \setminus \operatorname{supp} \mathbf{j}^{(s)}$ ,  $t \in [t^0; T]$ , имеет вид:

$$L_T \varphi(\mathbf{x}, t) = \frac{c^2 \rho_\sigma(\mathbf{x}, t)}{\varepsilon \varepsilon_0} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_\sigma \varphi(\mathbf{x}, t) + c^2 \operatorname{div} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \right).$$

Аналогично подстановка уравнений (2.1) в уравнение Максвелла (1.6) с учетом уравнений (1.1) и (1.2) дает уравнение для векторного потенциала, которое можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} L_T \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t) - \nabla \left( \frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_\sigma \varphi(\mathbf{x}, t) + c^2 \operatorname{div} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \right) \in \mathcal{D}'(\Omega \times [t^0; T]); \\ L_T \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) &= -\nabla \left( \frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_\sigma \varphi(\mathbf{x}, t) + c^2 \operatorname{div} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \right) \text{ при } \mathbf{x} \in \Omega \setminus \operatorname{supp} \mathbf{j}^{(s)}, \quad t \in [t^0; T]. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Из уравнений (2.3), (2.4) следует, что уравнение калибровки:

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \omega_\sigma \varphi(\mathbf{x}, t) + c^2 \operatorname{div} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (2.5)$$

равносильно тому, что каждый из потенциалов удовлетворяет своему отдельному телеграфному уравнению, не содержащему другой потенциал, которое имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} L_T \varphi(\mathbf{x}, t) &= \frac{c^2}{\varepsilon \varepsilon_0} \left( \rho_\sigma(\mathbf{x}, t) + \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t) \right) \in \mathcal{D}'(\Omega \times [t^0; T]); \\ L_T \varphi(\mathbf{x}, t) &= \frac{c^2 \rho_\sigma(\mathbf{x}, t)}{\varepsilon \varepsilon_0} \text{ при } \mathbf{x} \in \Omega \setminus \operatorname{supp} \mathbf{j}^{(s)}, \quad t \in [t^0; T], \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\left. \begin{aligned} L_T \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t) \in \mathcal{D}'(\Omega \times [t^0; T]); \\ L_T \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) &= 0 \text{ при } \mathbf{x} \in \Omega \setminus \operatorname{supp} \mathbf{j}^{(s)}, \quad t \in [t^0; T]. \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Аналогично уравнению (1.10), уравнение калибровки (2.5) относительно  $\varphi(\mathbf{x}, t)$  по переменной  $t$  является обыкновенным линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка с постоянным коэффициентом, т. е. его решение описывается формулой Коши, применение которой дает формулу:

$$\varphi(\mathbf{x}, t) = e^{-\omega_\sigma(t-t^0)} \varphi(\mathbf{x}, t^0) - c^2 e^{-\omega_\sigma t} \int_{t^0}^t e^{\omega_\sigma \theta} \operatorname{div} \mathbf{A}(\mathbf{x}, \theta) d\theta. \quad (2.8)$$

Можно показать, что из уравнения для векторного потенциала (2.7), уравнения калибровки (2.5), уравнений баланса заряда (1.9), (1.10), а также уравнений (1.1), (1.2) и (2.1) вытекают уравнения Максвелла (1.3)-(1.6).

Отметим, что уравнение калибровки (2.5) приведено в [3] и является обобщением на случай однородного изотропного проводника калибровки Лоренца:

$$\frac{\partial \varphi_L(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + c^2 \operatorname{div} \mathbf{A}_L(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (2.9)$$

в которую оно переходит в случае нулевой проводимости  $\sigma = 0$ . В калибровке (2.5) для нахождения полей нужно найти решение только одного телеграфного уравнения (2.7) для векторного потенциала с заданным током источника в правой части, а затем найти скалярный потенциал по формуле (2.8). Таким образом, новая калибровка дает алгоритм нахождения полей, аналогичный тому, который дает калибровка Лоренца в случае диэлектрика, т. е. без нахождения плотности заряда в источнике.

### Решение задачи Коши для телеграфного уравнения в 3-мерном случае

Рассмотрим задачу Коши для пространственно 3-мерного линейного телеграфного уравнения, постановка которой полностью аналогична таковой для волнового уравнения:

$$L_T u(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \omega_\sigma \frac{\partial u}{\partial t} - c^2 \Delta u = f(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in \square^3, \quad t > 0, \quad (3.1)$$

$$u(\mathbf{x}, t)|_{t=0} = u^0(\mathbf{x}), \quad \left. \frac{\partial u(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = u_t^0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \square^3. \quad (3.2)$$

Здесь  $\omega_\sigma > 0$  и  $c > 0$  – заданные постоянные,  $f(\mathbf{x}, t)$ ,  $u^0(\mathbf{x})$  и  $u_t^0(\mathbf{x})$  – заданные функции. Полностью аналогично тому, как это сделано для линейного волнового уравнения в [6], можно показать, что решение задачи (3.1)-(3.2) представимо в виде суммы объемного телеграфного потенциала  $V_T^{(0)}[f](\mathbf{x}, t)$  с плотностью  $f(\mathbf{x}, t)$ , поверхностного телеграфного потенциала простого слоя  $V_T^{(1)}[u_t^0](\mathbf{x}, t)$  с плотностью  $u_t^0(\mathbf{x})$  и поверхностного телеграфного потенциала двойного слоя  $V_T^{(2)}[u^0](\mathbf{x}, t)$  с плотностью  $u^0(\mathbf{x})$ :

$$u(\mathbf{x}, t) = V_T^{(0)}[f](\mathbf{x}, t) + V_T^{(1)}[u_t^0](\mathbf{x}, t) + V_T^{(2)}[u^0](\mathbf{x}, t). \quad (3.3)$$

При этом потенциалы определяются как свертки:

$$\left. \begin{aligned} V_T^{(0)}[f](\mathbf{x}, t) &= E_T(\mathbf{x}, t) * f(\mathbf{x}, t) = \int_{\square^4} E_T(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - \tau) f(\mathbf{y}, \tau) d^3 \mathbf{y} d\tau, \\ V_T^{(1)}[u_t^0](\mathbf{x}, t) &= E_T(\mathbf{x}, t) * u_t^0(\mathbf{x}) = \int_{\square^3} E_T(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t) u_t^0(\mathbf{y}) d^3 \mathbf{y}, \\ V_T^{(2)}[u^0](\mathbf{x}, t) &= \frac{\partial}{\partial t} V_T^{(1)}[u^0](\mathbf{x}, t) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

с фундаментальным решением  $E_T(\mathbf{x}, t)$  3-мерного телеграфного оператора  $L_T$ , которое определяется как решение уравнения  $L_T E_T(\mathbf{x}, t) = \delta(\mathbf{x}, t)$ . Отметим, что непосредственно найти  $E_T(\mathbf{x}, t)$ , используя преобразование Фурье, не получается. Для получения  $E_T(\mathbf{x}, t)$  задачу Коши (3.1)-(3.2) необходимо преобразовать заменой коэффициента и неизвестной функции

$$\omega_\sigma = -2i\omega, \quad u(\mathbf{x}, t) = e^{-\frac{1}{2}\omega_\sigma t} w(\mathbf{x}, t) = e^{i\omega t} w(\mathbf{x}, t) \quad (3.5)$$

к следующей задаче Коши для уравнения Клейна – Гордона – Фока [6]:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c^2 \Delta w + \omega^2 w = F(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in \square^3, \quad t > 0, \quad \text{где } F(\mathbf{x}, t) = e^{\frac{1}{2}\omega_\sigma t} f(\mathbf{x}, t) = e^{-i\omega t} f(\mathbf{x}, t),$$

$$w(\mathbf{x}, t)|_{t=0} = u^0(\mathbf{x}), \quad \left. \frac{\partial w(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = w_t^0(\mathbf{x}) = u_t^0(\mathbf{x}) + \frac{\omega_\sigma}{2} u^0(\mathbf{x}) = u_t^0(\mathbf{x}) - i\omega u^0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \square^3.$$

Фундаментальное решение 3-мерного оператора Клейна – Гордона – Фока, которое обозначим как  $E_{KGF}(\mathbf{x}, t)$ , находится с помощью преобразования Фурье и имеет следующий вид (см., например, [6]):

$$\left. \begin{aligned} E_{KGF}(\mathbf{x}, t) &= E_W(\mathbf{x}, t) + E_{KGF}^{(1)}(\mathbf{x}, t) = \\ &= \frac{\theta(t)}{4\pi c^2 t} \delta_{S_{ct}}(\mathbf{x}) - \frac{\omega \theta(t) \theta(ct - |\mathbf{x}|)}{4\pi c^2 \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2}} J_1\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2}\right), \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

где  $E_W(\mathbf{x}, t) = \frac{\theta(t)}{4\pi c^2 t} \delta_{S_{ct}}(\mathbf{x})$  – фундаментальное решение 3-мерного волнового

оператора;  $E_{KGF}^{(1)}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\omega \theta(t) \theta(ct - |\mathbf{x}|)}{4\pi c^2 \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2}} J_1\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2}\right)$  –

дополнительное к волновой части слагаемое;  $\theta(t)$  – тета-функция Хевисайда;  $\delta_{S_{ct}}(\mathbf{x})$  – простой слой на сфере  $S_{ct} = \{\mathbf{x} : |\mathbf{x}| = ct\}$  с плотностью 1;  $J_1(s)$  – функции Бесселя. Применяя к (3.6) обратное преобразование (3.5) и учитывая равенство  $I_1(s) = -iJ_1(is)$  для модифицированной функции Бесселя (функции Инфельда), получим для  $E_T(\mathbf{x}, t)$  следующее выражение:

$$\left. \begin{aligned} E_T(\mathbf{x}, t) &= E_W(\mathbf{x}, t) e^{-\frac{1}{2}\omega_\sigma t} + E_T^{(1)}(\mathbf{x}, t) = \\ &= e^{-\frac{1}{2}\omega_\sigma t} \left( \frac{\theta(t)}{4\pi c^2 t} \delta_{S_{ct}}(\mathbf{x}) + \frac{\omega_\sigma \theta(t) \theta(ct - |\mathbf{x}|)}{8\pi c^2 \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2}} I_1\left(\frac{\omega_\sigma}{2c} \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2}\right) \right), \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

которое приведено в [1] и содержит дополнительное к волновой части «шлейфовое» слагаемое

$$E_r^{(1)}(\mathbf{x}, t) = e^{-\frac{1}{2}\omega_\sigma t} \frac{\omega_\sigma \theta(t) \theta(ct - |\mathbf{x}|)}{8\pi c^2 \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2}} I_1 \left( \frac{\omega_\sigma}{2c} \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{x}|^2} \right).$$

Подставляя формулы (3.7) в (3.4), можно получить следующие выражения для телеграфных потенциалов:

$$V_T^{(0)}[f](\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi c^2} \int_{|\mathbf{y}| \leq ct} \frac{f(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - |\mathbf{y}|/c)}{|\mathbf{y}|} e^{-\frac{\omega_\sigma |\mathbf{y}|}{2c}} d^3 \mathbf{y} + \left. \begin{aligned} & + \frac{\omega_\sigma}{8\pi c^2} \int_0^t e^{-\frac{\omega_\sigma \tau}{2}} \left( \int_{|\mathbf{y}| \leq c\tau} I_1 \left( \frac{\omega_\sigma}{2c} \sqrt{(c\tau)^2 - |\mathbf{y}|^2} \right) \frac{f(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - \tau)}{\sqrt{(c\tau)^2 - |\mathbf{y}|^2}} d^3 \mathbf{y} \right) d\tau, \end{aligned} \right\} (3.8)$$

$$V_T^{(1)}[u_t^0](\mathbf{x}, t) = \left. \begin{aligned} & = \frac{e^{-\frac{1}{2}\omega_\sigma t}}{4\pi c^2} \left( \frac{1}{t} \int_{|\mathbf{y}|=ct} u_t^0(\mathbf{x} - \mathbf{y}) dS_y + \frac{\omega_\sigma}{2} \int_{|\mathbf{y}| \leq ct} I_1 \left( \frac{\omega_\sigma}{2c} \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{y}|^2} \right) \frac{u_t^0(\mathbf{x} - \mathbf{y})}{\sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{y}|^2}} d^3 \mathbf{y} \right), \end{aligned} \right\} (3.9)$$

$$V_T^{(2)}[u^0](\mathbf{x}, t) = \left. \begin{aligned} & = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{e^{-\frac{1}{2}\omega_\sigma t}}{4\pi c^2} \left( \frac{1}{t} \int_{|\mathbf{y}|=ct} u^0(\mathbf{x} - \mathbf{y}) dS_y + \frac{\omega_\sigma}{2} \int_{|\mathbf{y}| \leq ct} I_1 \left( \frac{\omega_\sigma}{2c} \sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{y}|^2} \right) \frac{u^0(\mathbf{x} - \mathbf{y})}{\sqrt{(ct)^2 - |\mathbf{y}|^2}} d^3 \mathbf{y} \right) \right). \end{aligned} \right\} (3.10)$$

Таким образом, формулы (3.3), (3.8)-(3.10) описывают решение задачи Коши (3.1), (3.2) для телеграфного уравнения в 3-мерном случае аналогично формуле Кирхгофа для линейного волнового уравнения.

### Поле электрического диполя Герца в бесконечной однородной изотропной среде

Рассмотрим случай, когда электрический диполь Герца с произвольной зависимостью тока от времени расположен в начале координат в бесконечной однородной изотропной среде и включается в момент времени  $t = 0$ . Тогда ток в источнике удобно обозначить как:

$$\mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t) = \delta(\mathbf{x}) \mathbf{P}'(t), \quad \mathbf{P}(t) \equiv 0 \quad \text{при } t \leq 0, \quad (4.1)$$

где через  $\mathbf{P}(t)$  и  $\mathbf{P}'(t) = \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt}$  обозначены момент диполя как функция

времени и ее производная. Например, в случае диэлектрика  $\mathbf{P}(t) = lQ(t)\mathbf{v}(t)$ , где  $\mathbf{v}(t)$  – единичный вектор направления;  $Q(t)$  – заряд диполя, а в случае стационарного диполя в проводнике  $\mathbf{P}'(t) \equiv \mathbf{P}'_0 = I_0 l \mathbf{v} = \text{Const}$ . Тогда векторный потенциал  $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$  согласно уравнению (2.7) является решением задачи Коши (3.1), (3.2) с правой частью  $f(\mathbf{x}, t) = \delta(\mathbf{x}) \mathbf{P}'(t) / (\epsilon \epsilon_0)$  и нулевыми начальными условиями. Из формул (3.3), (3.8)-(3.10) следует, что

$$A(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} V_T^{(0)} [\delta(\mathbf{x}) \overline{P'(t)}](\mathbf{x}, t) = A_1(\mathbf{x}, t) + A_2(\mathbf{x}, t), \quad (4.2)$$

где волновое слагаемое  $A_1(\mathbf{x}, t)$  определяется формулой:

$$A_1(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi |\mathbf{x}|} \mathbf{P}' \left( t - \frac{1}{c} |\mathbf{x}| \right) e^{-\frac{\omega_\sigma |\mathbf{x}|}{2c}}, \quad (4.3)$$

а второе слагаемое  $A_2(\mathbf{x}, t)$ , названное в [1] «шлейфовым», определяется формулой:

$$A_2(\mathbf{x}, t) = \omega_\sigma \frac{\mu_0 \mu}{8\pi} \theta(ct - |\mathbf{x}|) \int_{|\mathbf{x}|/c}^t \frac{\mathbf{P}'(t - \tau)}{\sqrt{(c\tau)^2 - |\mathbf{x}|^2}} I_1 \left( \frac{\omega_\sigma}{2c} \sqrt{(c\tau)^2 - |\mathbf{x}|^2} \right) e^{-\frac{\omega_\sigma \tau}{2}} d\tau. \quad (4.4)$$

Отметим, что в случае диэлектрика  $\omega_\sigma = 0$ , и из формул (4.2)-(4.4) получаем решение:

$$A_L(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi |\mathbf{x}|} \mathbf{P}'(t - |\mathbf{x}|/c), \quad (4.5)$$

которое с учетом калибровки Лоренца (2.9) дает следующее уравнение для скалярного потенциала:

$$\frac{\partial \Phi_L(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -c^2 \operatorname{div} A_L(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 |\mathbf{x}|^3} \left( (\mathbf{x}; \mathbf{P}'(t - |\mathbf{x}|/c)) + \frac{|\mathbf{x}|}{c} (\mathbf{x}; \mathbf{P}''(t - |\mathbf{x}|/c)) \right),$$

где через  $(\mathbf{a}; \mathbf{b})$  обозначено скалярное произведение векторов в пространстве  $\square^3$ . Интегрирование этого уравнения по времени с учетом нулевых начальных условий дает решение:

$$\Phi_L(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 |\mathbf{x}|^3} \left( (\mathbf{x}; \mathbf{P}(t - |\mathbf{x}|/c)) + \frac{|\mathbf{x}|}{c} (\mathbf{x}; \mathbf{P}'(t - |\mathbf{x}|/c)) \right). \quad (4.6)$$

Подставляя полученное решение (4.5), (4.6) в формулы (2.1), нетрудно получить выражения для полей, которые выведены в [7] при помощи значительно более длинных выкладок.

### Случай гармонических по времени полей

Рассмотрим важный случай, когда ток в источнике, а значит и поля, гармонически зависят от времени:

$$\mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{j}_m^{(s)}(\mathbf{x}) \cdot e^{i\omega_0 t}, \quad F(\mathbf{x}, t) = F_m(\mathbf{x}) \cdot e^{i\omega_0 t}, \quad F = \varphi, \mathbf{A}, \mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{H}, \mathbf{B}, \quad (5.1)$$

где  $\omega_0$  – частота источника, и, следуя [8], через  $F_m(\mathbf{x})$  обозначена комплексная амплитуда. В этом случае телеграфное уравнение переходит в уравнение Гельмгольца для комплексных амплитуд:

$$L_T u(\mathbf{x}, t) = f(\mathbf{x}, t) \mapsto \Delta u_m(\mathbf{x}) + k^2 u_m(\mathbf{x}) = -\frac{f_m(\mathbf{x})}{c^2}, \quad (5.2)$$

где  $k^2 = \omega_0(\omega_0 - i\omega_\sigma)/c^2 = \mu\mu_0\omega_0(\varepsilon\varepsilon_0\omega_0 - i\sigma)$ ,

т. е.

$$k = \sqrt{\frac{\mu\mu_0\omega_0\sigma}{2}} \left( \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_\sigma}\right)^2} - \left(\frac{\omega_0}{\omega_\sigma}\right) \right)^{-1/2} - i \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_\sigma}\right)^2} - \left(\frac{\omega_0}{\omega_\sigma}\right) \right)^{1/2} \right), \quad \omega_\sigma = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (5.3)$$

Из калибровки (2.5) и подстановки (5.1) вытекает соотношение:

$$\Phi_m(\mathbf{x}) = \frac{-c^2}{i\omega_0 + \omega_\sigma} \operatorname{div} \mathbf{A}_m(\mathbf{x}) = \frac{i\omega_0}{k^2} \operatorname{div} \mathbf{A}_m(\mathbf{x}). \quad (5.4)$$

Подставляя это соотношение в (2.1), получаем выражение для амплитуд полей через амплитуду только одного векторного потенциала:

$$\mathbf{B}_m(\mathbf{x}) = \operatorname{rot} \mathbf{A}_m(\mathbf{x}), \quad \mathbf{E}_m(\mathbf{x}) = -\nabla \Phi_m(\mathbf{x}) - i\omega_0 \mathbf{A}_m(\mathbf{x}) = -i\omega_0 \left( \mathbf{A}_m(\mathbf{x}) + \frac{1}{k^2} \nabla \operatorname{div} \mathbf{A}_m(\mathbf{x}) \right). \quad (5.5)$$

Таким образом, для определения полей нужно решить уравнение Гельмгольца для комплексной амплитуды векторного потенциала:

$$\Delta \mathbf{A}_m(\mathbf{x}) + k^2 \mathbf{A}_m(\mathbf{x}) = -\mu\mu_0 \mathbf{j}_m^{(s)}(\mathbf{x}), \quad (5.6)$$

а затем найти амплитуды полей по формулам (5.5). Отметим, что формулы (5.4)-(5.6) по форме полностью совпадают с записанными через волновое число формулами для диэлектрика (см., например, [1-5] и [7, 8]), когда волновое число является чисто вещественным:

$$k \mapsto k_0 = \omega_0/c = \omega_0 \sqrt{\varepsilon\mu} / c_0. \quad (5.7)$$

Отметим, что гармонические по времени поля в однородном изотропном проводнике для многих типов источников рассматривались в низкочастотном пределе (см. [1-5]), т. е. без учета тока смещения, когда  $\omega_0 \ll \omega_\sigma = \sigma/(\varepsilon\varepsilon_0)$ .

В этом приближении в определяемом в (5.2) квадрате волнового числа  $k^2$  отбрасывается вещественная часть, т. е.  $k^2$  считается чисто мнимым:

$$k^2 = -i\omega_0\omega_\sigma/c^2 = -i\mu\mu_0\omega_0\sigma. \quad (5.8)$$

Известен широкий набор задач (см. [1-5]), в каждой из которых получено приближенное «низкочастотное» решение для векторного потенциала, т. е. получено решение уравнения (5.6) с соответствующими граничными условиями и условиями на бесконечности и с волновым числом, определяемым формулой (5.8). Калибровка (2.5) позволяет получить точное решение полных уравнений Максвелла для каждой задачи из этого набора в результате следующей формальной процедуры. Нужно выразить граничные условия и решение уравнения (5.6) в каждой из рассматриваемых в данной задаче сред через определяемые по формуле (5.8) волновые числа сред. Далее нужно в решении уравнения (5.6) для каждой среды и в граничных условиях волновые числа сред определять по формуле из (5.2), а амплитуды полей в каждой среде определять через амплитуду векторного потенциала по формулам (5.5). В качестве примера

рассмотрим две задачи: поле точечного электрического диполя (диполь Герца) в бесконечном проводнике, а также поле такого же горизонтального диполя на плоской границе раздела двух однородных изотропных сред (см. [1-5] и [7, 8]), одна из которых обязательно является проводником.

**Поле точечного электрического диполя в бесконечном проводнике**

Рассмотрим электрический диполь Герца в бесконечном проводнике с амплитудой тока  $I_m$ , расстоянием между заземлениями  $l$ , расположенный в начале координат и направленный вдоль единичного вектора  $\mathbf{v}$ . В этом случае

$$\mathbf{j}_m^{(s)}(\mathbf{x}) = I_m l \delta(\mathbf{x}) \mathbf{v}. \quad (5.9)$$

Из (5.3) следует, что  $\operatorname{Re}(ik) = -\operatorname{Im}(k) > 0$ , поэтому стремящееся к нулю при  $r = |\mathbf{x}| \rightarrow \infty$  решение уравнения (5.6) во всем пространстве  $\square^3$  имеет вид (см., например, [6, 8]):

$$\mathbf{A}_m(\mathbf{x}) = \mathbf{v} \cdot \mu \mu_0 I_m l e^{-ik|\mathbf{x}|} / (4\pi|\mathbf{x}|). \quad (5.10)$$

Отсюда по формулам (5.5) получаем следующие выражения для амплитуд полей:

$$\mathbf{B}_m(\mathbf{x}) = \frac{\mu \mu_0 I_m l e^{-ikr}}{4\pi r^3} (1 + ikr) \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{x}],$$

$$\mathbf{E}_m(\mathbf{x}) = i\omega_0 \frac{\mu \mu_0 I_m l e^{-ikr}}{4\pi r} \left( \left( \frac{1 + ikr}{k^2 r^2} - 1 \right) \mathbf{v} + \left( k^2 r^2 - 3 - 3ikr \right) \frac{(\mathbf{x}; \mathbf{v}) \mathbf{x}}{r^2} \right).$$

**Поле горизонтального электрического диполя на плоской границе раздела двух сред**

Пусть среда ( $\alpha = 1$ ) с параметрами  $\mu_1, \epsilon_1, \sigma_1$  занимает верхнее полупространство  $\{z > 0\}$ , а среда ( $\alpha = 2$ ) с параметрами  $\mu_2, \epsilon_2, \sigma_2$  занимает нижнее полупространство  $\{z < 0\}$ . Будем считать, что описанный выше электрический диполь расположен в начале координат и направлен вдоль оси  $OX$ , т. е.  $\mathbf{v} = \mathbf{e}_x$  – вектор декартова базиса. Тогда в каждой из двух сред уравнение (5.6) примет вид:

$$\Delta \mathbf{A}_m^{(\alpha)}(\mathbf{x}) + k_\alpha^2 \mathbf{A}_m^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = -2\gamma_\alpha \mu_\alpha \mu_0 I_m l \delta(\mathbf{x}) \mathbf{e}_x, \quad (5.11)$$

где  $k_\alpha^2 = \mu_\alpha \mu_0 \omega_0 (\epsilon_\alpha \epsilon_0 \omega_0 - i\sigma_\alpha)$ ,  $\alpha = 1, 2$ ,

и где неизвестные заранее коэффициенты  $\gamma_1$  и  $\gamma_2 = 1 - \gamma_1$  определяются в ходе решения задачи из стандартных условий непрерывности нормальной компоненты магнитной индукции и касательной составляющей напряженности

электрического поля при переходе через границу раздела сред – плоскость  $\{z = 0\}$ , которые имеют вид:

$$B_{mz}^{(1)}(\mathbf{x})\Big|_{z=+0} = B_{mz}^{(2)}(\mathbf{x})\Big|_{z=-0}, \quad E_{mx}^{(1)}(\mathbf{x})\Big|_{z=+0} = E_{mx}^{(2)}(\mathbf{x})\Big|_{z=-0}, \quad E_{my}^{(1)}(\mathbf{x})\Big|_{z=+0} = E_{my}^{(2)}(\mathbf{x})\Big|_{z=-0}, \quad (5.12)$$

а также из условия отсутствия поверхностного тока на границе раздела, которое означает непрерывность касательной составляющей напряженности магнитного поля при переходе через эту границу и в рассматриваемом случае может быть представлено в виде:

$$\frac{1}{\mu_1} B_{mx}^{(1)}(\mathbf{x})\Big|_{z=+0} = \frac{1}{\mu_2} B_{mx}^{(2)}(\mathbf{x})\Big|_{z=-0}, \quad \frac{1}{\mu_1} B_{my}^{(1)}(\mathbf{x})\Big|_{z=+0} = \frac{1}{\mu_2} B_{my}^{(2)}(\mathbf{x})\Big|_{z=-0}. \quad (5.13)$$

Из соображений симметрии (см. [1-4]) вытекает, что векторный потенциал имеет только 2 компоненты:

$$\left. \begin{aligned} A_m^{(\alpha)}(\mathbf{x}) &= A_{mx}^{(\alpha)}(\mathbf{x})\mathbf{e}_x + A_{mz}^{(\alpha)}(\mathbf{x})\mathbf{e}_z, \\ \text{т. е. } \mathbf{B}_m^{(\alpha)}(\mathbf{x}) &= \frac{\partial A_{mz}^{(\alpha)}}{\partial y} \mathbf{e}_x + \left( \frac{\partial A_{mx}^{(\alpha)}}{\partial z} - \frac{\partial A_{mz}^{(\alpha)}}{\partial x} \right) \mathbf{e}_y - \frac{\partial A_{mx}^{(\alpha)}}{\partial y} \mathbf{e}_z \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

В этом случае из 1-го условия в (5.12) вытекает равенство:

$$A_{mx}^{(1)}(\mathbf{x})\Big|_{z=+0} = A_{mx}^{(2)}(\mathbf{x})\Big|_{z=-0}, \quad (5.15)$$

из 2-го и 3-го условий в (5.12) с учетом (5.15) вытекает равенство:

$$\frac{1}{k_1^2} \left( \frac{\partial A_{mx}^{(1)}(\mathbf{x})}{\partial x} + \frac{\partial A_{mz}^{(1)}(\mathbf{x})}{\partial z} \right) \Big|_{z=+0} = \frac{1}{k_2^2} \left( \frac{\partial A_{mx}^{(2)}(\mathbf{x})}{\partial x} + \frac{\partial A_{mz}^{(2)}(\mathbf{x})}{\partial z} \right) \Big|_{z=-0}, \quad (5.16)$$

из 1-го условия в (5.13) вытекает равенство:

$$\frac{1}{\mu_1} A_{mz}^{(1)}(\mathbf{x})\Big|_{z=+0} = \frac{1}{\mu_2} A_{mz}^{(2)}(\mathbf{x})\Big|_{z=-0}, \quad (5.17)$$

а из 2-го условия в (5.13) с учетом (5.15) вытекает равенство:

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_{mx}^{(1)}(\mathbf{x})}{\partial z} \Big|_{z=+0} = \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_{mx}^{(2)}(\mathbf{x})}{\partial z} \Big|_{z=-0}. \quad (5.18)$$

В [2] были получены граничные условия (5.15)-(5.18), предложен метод нахождения решений уравнений (5.11), которые удовлетворяют этим условиям, а также получено такое решение для случая  $\mu_1 = \mu_2 = 1$ . Этим же методом для общего случая нами получено решение, которое в системе СИ можно представить в виде:

$$A_{mx}^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = \mu_0 \mu_1 \mu_2 \frac{I_m l}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\lambda e^{-z/\sqrt{\lambda^2 - k_\alpha^2}} J_0(\lambda \sqrt{x^2 + y^2}) d\lambda}{(\mu_1 \sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + \mu_2 \sqrt{\lambda^2 - k_1^2})}, \quad (5.19)$$

$$A_{mz}^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0 \mu_1 \mu_2 I_m l x}{2\pi \mu_\alpha \sqrt{x^2 + y^2}} \int_0^{+\infty} \frac{(k_1^2 - k_2^2) \lambda^2 e^{-z/\sqrt{\lambda^2 - k_\alpha^2}} J_1(\lambda \sqrt{x^2 + y^2}) d\lambda}{(\mu_1 \sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + \mu_2 \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}) (k_1^2 \mu_2 \sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + k_2^2 \mu_1 \sqrt{\lambda^2 - k_1^2})}, \quad (5.20)$$

где  $J_0(s)$  и  $J_1(s)$  – функции Бесселя. Из этих формул вытекает равенство:

$$\operatorname{div} A_m^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = -k_\alpha^2 \frac{\mu_0 \mu_1 \mu_2 I_m l x}{2\pi \sqrt{x^2 + y^2}} \int_0^{+\infty} \frac{(\mu_1 \sqrt{\lambda^2 - k_1^2} + \mu_2 \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}) \lambda^2 e^{-z/\sqrt{\lambda^2 - k_\alpha^2}} J_1(\lambda \sqrt{x^2 + y^2}) d\lambda}{(\mu_1 \sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + \mu_2 \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}) (k_1^2 \mu_2 \sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + k_2^2 \mu_1 \sqrt{\lambda^2 - k_1^2})}. \quad (5.21)$$

Полученное точное решение позволяет по формулам (5.5) с учетом формулы (5.21) найти амплитуды полей в любой точке пространства. Нетрудно проверить, что в случае одинаковых сред оно совпадает с решением (5.10) для всего пространства. Отметим, что в пределе  $\omega_0 \mapsto +0$  полученное решение переходит в решение стационарной задачи  $A_m^{(\alpha)}(\mathbf{x}) \mapsto A^{(\alpha)}(\mathbf{x})$ , для которой уравнения (5.11) примут вид уравнений Пуассона:

$$\Delta A^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = -2\gamma_\alpha \mu_\alpha \mu_0 I_m l \delta(\mathbf{x}) \mathbf{e}_x, \quad \alpha = 1, 2.$$

При этом в пределе  $\omega_0 \mapsto +0$  из формул (5.19), (5.20) получаются следующие выражения:

$$A_{mx}^{(\alpha)}(\mathbf{x}) \mapsto A_x(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0 \mu_1 \mu_2}{(\mu_1 + \mu_2)} \frac{I_m l}{2\pi |\mathbf{x}|},$$

$$A_{mz}^{(\alpha)}(\mathbf{x}) \mapsto A_z^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0 \mu_\alpha (\mu_2 \sigma_2 - \mu_1 \sigma_1)}{(\mu_1 + \mu_2) (\sigma_1 + \sigma_2)} \frac{I_m l x}{2\pi (x^2 + y^2)} \left( \frac{|z|}{|\mathbf{x}|} - 1 \right).$$

Это дает  $\operatorname{div} A^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = -\frac{\mu_0 \mu_\alpha \sigma_\alpha}{(\sigma_1 + \sigma_2)} \frac{I_m l x}{2\pi |\mathbf{x}|^3}$  и, поскольку  $\lim_{\omega_0 \mapsto +0} \frac{i\omega_0}{k_\alpha^2} = \frac{-1}{\mu_0 \mu_\alpha \sigma_\alpha}$ ,

то  $\varphi_m^{(\alpha)}(\mathbf{x}) = \frac{i\omega_0}{k_\alpha^2} \operatorname{div} A_m^{(\alpha)} \mapsto \varphi(\mathbf{x}) = -\frac{\operatorname{div} A^{(\alpha)}(\mathbf{x})}{\mu_0 \mu_\alpha \sigma_\alpha} = \frac{I_m l x}{2\pi (\sigma_1 + \sigma_2) |\mathbf{x}|^3}$ . То есть

в стационарном случае электрическое поле и компонента  $A_x(\mathbf{x})$  векторного потенциала описываются одинаковыми формулами в обеих средах и получают следующие значения коэффициентов в уравнениях (5.11):  $\gamma_1 = \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2)$  и  $\gamma_2 = \mu_1 / (\mu_1 + \mu_2)$ .

## **Заключение**

В работе впервые получена формула, описывающая решение задачи Коши для телеграфного уравнения в 3-мерном пространстве, аналогичная (и переходящая в нее при нулевой проводимости) формуле Кирхгофа для волнового уравнения. На основе полученной формулы найдено решение задачи о поле электрического диполя Герца с произвольной зависимостью тока от времени в бесконечном однородном изотропном проводнике. Также получено точное решение во всем пространстве для важной задачи о поле гармонического по времени электрического диполя Герца, расположенного горизонтально на границе раздела двух сред. Ранее для этой задачи были известны только приближенные выражения для полей в плоскости раздела. Эти результаты имеют большое значение для разработки и тестирования физически адекватных численных методов решения уравнений Максвелла в проводнике, а также для разработки численных моделей распространения низкочастотных сигналов в волноводе Земля – ионосфера.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-00063.

## **Литература**

1. Светов Б. С. Основы геоэлектрики. М.: ЛКИ, 2008. 656 с.
2. Заборовский А. И. Электроразведка. М.: ГНТИ Нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. 429 с.
3. Матвеев Б. К. Электроразведка. 2-е изд. М.: Недра, 1990. 368 с.
4. Крылов С. С. Геоэлектрика: Поля искусственных источников. СПб.: СПбГУ, 2004. 138 с.
5. Wait J. R. Geo-Electromagnetism. N. Y.: ACADEMIC PRESS, 1982.
6. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. 5-е изд. М.: Наука, 1988.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. 4-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ; МФТИ, 2004.
8. Никольский Н. Н., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. 544 с.

## **Сведения об авторах**

### **Мельник Михаил Николаевич,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
melnik@pgia.ru

### **Олег Иршатович Ахметов,**

к.физ.-мат.н., научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты,  
akhmetov@pgia.ru

### **Мингалев Игорь Викторович**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, mingalev\_i@pgia.ru

### **Мингалев Олег Викторович,**

к.физ.-мат.н., и. о. заведующего сектором № 203, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, mingalev\_o@pgia.ru

УДК 551.513:551.515.2

К. Г. Орлов, И. В. Мингалев, В. С. Мингалев, В. М. Четчин, О. В. Мингалев

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЗИМЫ И ЛЕТА

### Аннотация

Представлены результаты моделирования общей циркуляции атмосферы Земли для условий зимы и лета. Созданная авторами модель основана на численном решении полной системы уравнений газовой динамики на трехмерной пространственной сетке с разрешением по горизонту 0.47 градуса. В этой модели учитываются несферичность поверхности Земли и ее рельеф, а также отличие поля тяготения Земли от сферически симметричного поля. В представленной версии модели используется упрощенный способ расчета скорости нагрева-охлаждения атмосферы за счет поглощения-испускания электромагнитного излучения (так называемое релаксационное приближение). Главное внимание уделяется процессам формирования и эволюции крупномасштабных сдвиговых течений в нижней тропосфере, а также процессам развития возмущений в этих течениях, которые приводят к разрушению сдвиговых течений и формированию крупномасштабных циклонических вихрей.

### Ключевые слова:

*Полярный геофизический институт, циркуляция атмосферы, циклонические вихри, математическое моделирование.*

K. G. Orlov, I. V. Mingalev, V. S. Mingalev, V. M. Chechetkin, O. V. Mingalev

## NUMERICAL MODELING OF THE GLOBAL EARTH'S ATMOSPHERIC CIRCULATION FOR THE WINTER AND SUMMER CONDITIONS

### Abstract

The results of modeling the global circulation of the Earth's atmosphere for the winter and summer conditions are presented. The model, developed by authors, is based on the numerical solution of the complete system of gas dynamics equations in a layer surrounding the Earth globally, with the latitude and longitude steps being equal to 0.47°, and height step being equal to 200 m. The non-sphericity of the Earth and its relief are taken into account in this model. A simplified method of calculation of the rate of heating-cooling air through the absorption-emission of electromagnetic radiation is used in this model. The focus is on the processes of formation and evolution of large-scale shear flows in the lower troposphere, and the processes of development of disturbances in such currents, which lead to the destruction of shear flow and the formation of large-scale cyclonic eddies.

### Keywords:

*Polar Geophysical Institute, atmospheric circulation, cyclonic vortices, mathematical modeling.*

### Описание модели

Данная модель построена с учетом фазовых переходов водяного пара в микрокаплях воды и частиц льда и с учетом оседания этих капель и частиц льда в поле силы тяжести. Описание подобной модели для ограниченного участка земной поверхности подробно изложено в работе [1].

Область моделирования простирается от поверхности до высоты 95 км на полюсах и до 75 км – на экваторе. В этой модели используется регулярная пространственная сетка в сферических координатах. Шаги сетки составляют  $0.47^\circ$  по горизонту и 200 м – по высоте. На полюсах узлов сетки нет.

Ближайшие к полюсам узлы сетки отстоят от них по широте на половину шага. Сетка имеет 768 узлов по долготе и 384 узла по широте.

Для численного решения системы уравнений использовалась явная разностная схема, детально описанная в работе [2] и хорошо себя зарекомендовавшая при расчетах динамики сложных трехмерных течений сжимаемого газа.

### Начальные и граничные условия

Содержание водяных капель и микрочастиц льда в воздухе в начальный момент задавалось равным нулю во всей области моделирования. Начальная температура задавалась по эмпирической модели NRLMSISE-00. Начальная плотность водяного пара в узлах сетки задавалась равной 60 % от плотности насыщенного водяного пара при температуре в данном узле сетки. Значения начальной плотности воздуха на поверхности определялись по эмпирической модели NRLMSISE-00. Зависимость начальной плотности воздуха от высоты определялась из условия гидростатического равновесия. Скорость ветра в начальный момент полагалась равной нулю.

На верхней и нижней границах области моделирования задавалось условие непротекания и Релеевское трение. Сила трения вычислялась по формуле:

$$F_{\text{тр}} = -\rho v_{\text{гор}} \cdot K_{\text{тр}},$$

где  $v_{\text{гор}}$  – вектор горизонтальной скорости;  $\rho$  – плотность;  $K_{\text{тр}}$  – коэффициент поверхностного трения.

### Упрощенное описание радиационного нагрева атмосферы

Используемый в модели упрощенный способ расчета нагрева/охлаждения атмосферы за счет поглощения/испускания электромагнитного излучения (так называемое релаксационное приближение) заключается в том, что мощность нагрева/охлаждения атмосферного газа в единице объема за счет поглощения/испускания электромагнитного излучения считается прямо пропорциональной отклонению температуры атмосферного газа от специально подобранной релаксационной температуры  $T_{\text{рел}}$ . Эта мощность вычисляется по формуле:

$$Q(t, h, \phi, \beta) = \frac{3}{2} \rho R_{\text{атм}} \frac{(T_{\text{рел}}(t, h, \phi, \beta) - T(t, h, \phi, \beta))}{\tau_{\text{рел}}(h)},$$

где  $t, h, \phi, \beta$  – время, высота, долгота, широта соответственно;  $\tau_{\text{рел}}(h)$  – зависящее только от высоты время релаксации. Релаксационная температура  $T_{\text{рел}}(t, h, \phi, \beta)$  вместе со временем релаксации подбирается так, чтобы максимально приблизить значения мощности нагрева/охлаждения в единице объема  $Q$  к имеющимся экспериментальным данным.

Один из способов задания релаксационной температуры следующий:

$$T_{\text{рел}}(t, h, \phi, \beta) = T_{\text{ср}}(h) + T_{\text{нопр}}(h) \cdot (\max\{\cos\theta, 0\} - 0.25) \quad (1)$$

В этой формуле  $T_{\text{ср}}(h)$  – средняя температура на высоте  $h$ , заданная по модели NRLMSIS-00,  $\theta$  – зенитный угол солнца в точке с долготой  $\phi$  и широтой  $\beta$  в текущий момент времени. Второе слагаемое правой части формулы (1) задает нагрев на освещенной стороне и выхолаживание на ночной стороне, причем  $T_{\text{нопр}}(h)$  – поправочная температура, которая подбирается так, чтобы обеспечить наилучшее соответствие результатов моделирования данным наблюдений. В данной работе  $T_{\text{нопр}}(h)$  бралась равной 60 К для всех высот.

Другой способ задания релаксационной температуры имеет вид:

$$T_{\text{рел}}(t, h, \phi, \beta) = T_{\text{msis}}(t, h, \phi, \beta), \quad (2)$$

где  $T_{\text{msis}}(t, h, \phi, \beta)$  – температура, заданная по модели NRLMSIS-00 для рассматриваемой даты.

### Результаты моделирования

Авторами было проведено моделирование процесса установления общей циркуляции атмосферы Земли для дат 16 января и 16 июля. Релаксационная температура задавалась по формуле (2).

Для даты 16 января через 4900 ч физического времени качественная картина циркуляции имеет следующие особенности. На рис.1 изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. В тропических широтах обоих полушарий горизонтальный ветер направлен преимущественно к экватору и на запад, образуя пассаты. Таким образом, в районе экватора образуется область, где имеет место сдвиговое течение. Такая область называется внутритропической зоной конвергенции. В области умеренных широт обоих полушарий горизонтальный ветер направлен преимущественно к полюсам и на восток, а в полярных областях обоих полушарий – преимущественно к экватору и на запад. Около 65 ° широты в северном и южном полушариях образуется сдвиговое течение, называемое арктическим фронтом. С некоторой периодичностью арктический фронт разрушается, а затем появляется снова, что хорошо согласуется с наблюдениями. Таким образом, на высоте 1 км можно наблюдать наличие трех ячеек циркуляции в северном полушарии (приполюсная ячейка, ячейка Ферреля и ячейка Хэдли) и трех ячеек циркуляции в южном полушарии.

На рисунке 2 крупным планом изображен участок области моделирования от 16 ° южной широты до 16 ° северной широты и от 40 до 130 ° по долготе. На этом рисунке изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. Около 3 ° широты в северном полушарии можно наблюдать внутритропическую зону конвергенции.

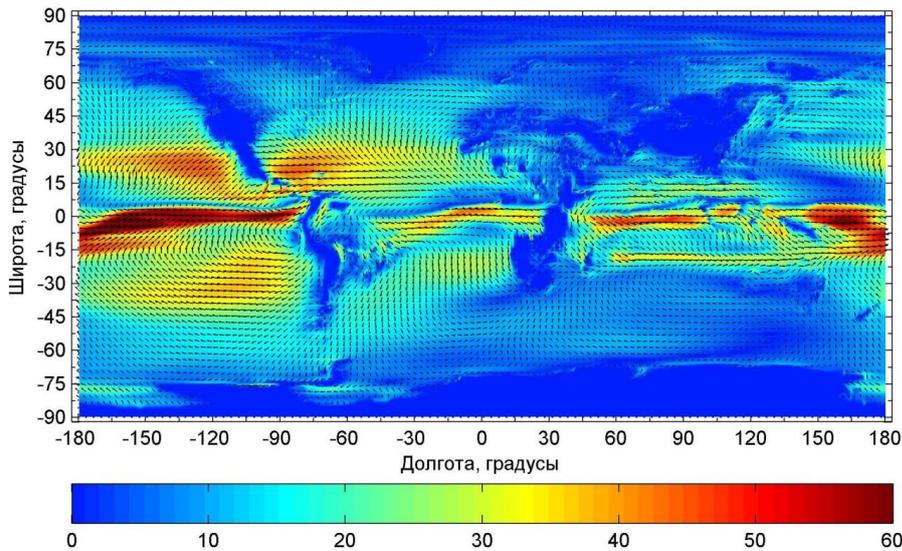


Рис.1. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 4900 ч после начала моделирования

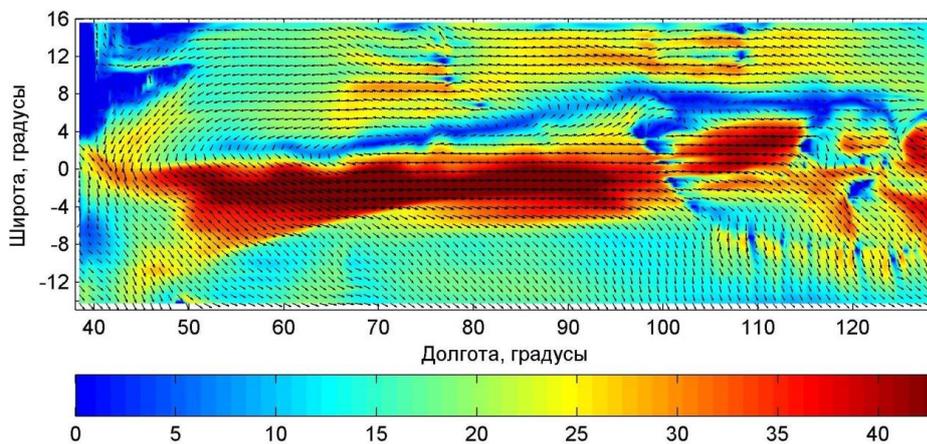


Рис.2. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 4900 ч после начала моделирования (локальная область)

Для даты 16 июля через 2130 ч физического времени качественная картина циркуляции имеет следующие особенности. На рис.3 изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. В районе экватора образуется область, где имеет место сдвиговое течение. Скорость ветра здесь местами достигает 65 м/с. В области умеренных широт обоих полушарий горизонтальный ветер направлен преимущественно к полюсам и на восток, а в полярных областях обоих полушарий – преимущественно к экватору и на запад. Около 75 ° широты в северном полушарии образуется сдвиговое течение, называемое арктическим фронтом, который также как и в зимнее время с некоторой периодичностью разрушается и появляется снова. Таким образом, на высоте 1 км в летнее время также можно наблюдать наличие трех ячеек циркуляции в северном полушарии (приполюсная ячейка, ячейка Ферреля и ячейка Хэдли) и трех ячеек циркуляции в южном полушарии.

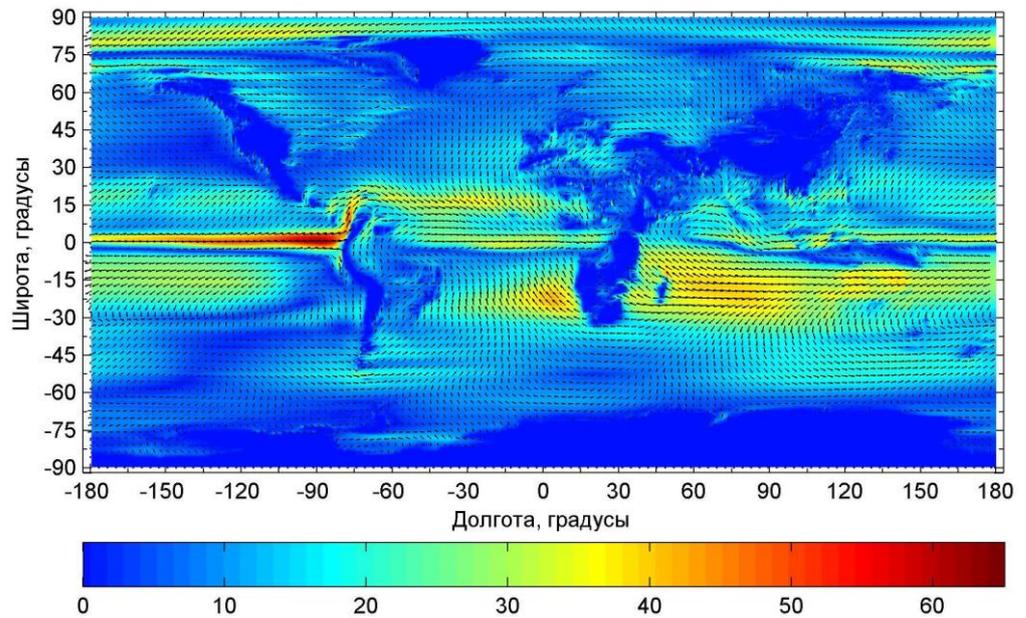


Рис.3. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 2130 ч после начала моделирования

На рисунке 4 крупным планом изображен участок области моделирования от  $16^\circ$  южной широты до  $16^\circ$  северной широты и от  $40$  до  $130^\circ$  по долготы. На этом рисунке изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. Около  $3^\circ$  широты в южном полушарии можно наблюдать внутритропическую зону конвергенции. А при  $2^\circ$  южной широты и  $74^\circ$  долготы наблюдается изгиб внутритропической зоны конвергенции, что может стать причиной зарождения тропического циклона [3].

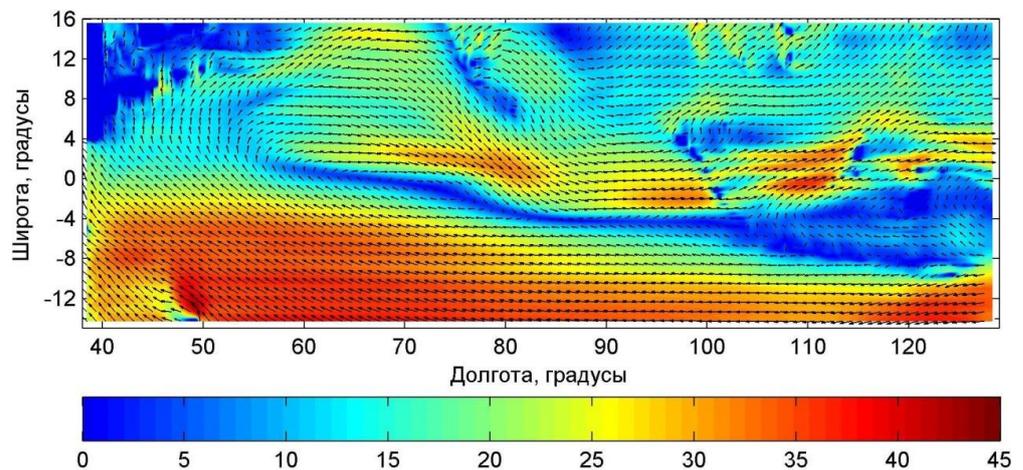


Рис.4. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 2130 ч после начала моделирования (локальная область)

## **Заключение**

В данной работе представлена новая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли, основанная на численном интегрировании полной системы уравнений динамики вязкого атмосферного газа на пространственной сетке с высоким разрешением. В модели учитываются рельеф земной поверхности и наличие в атмосфере аэрозолей из воды и льда, а также фазовые переходы водяного пара в аэрозольные частицы и обратно. Созданная авторами программная реализация модели использует массивные параллельные вычисления на нескольких графических ускорителях. Модель позволяет на новом уровне исследовать динамические процессы в атмосфере Земли, в том числе те процессы, которые ранее были недоступны для численного моделирования. В частности, позволяет моделировать процессы возникновения, движения и эволюции крупномасштабных вихрей в земной атмосфере.

Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Земли показало, что даже с использованием упрощенного способа нагрева атмосферы солнечным излучением можно получить качественную картину циркуляции, в которой имеют место основные тропосферные ячейки циркуляции (ячейки Хэдли, ячейки Ферреля и приполюсные ячейки) в обоих полушариях как для условий зимы, так и для лета. Из результатов моделирования видно, что учет рельефа поверхности существенным образом влияет на распределение горизонтального ветра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-01-00063.

## **Литература**

1. Мингалев И. В., Орлов К. Г., Мингалев В. С. Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 1. С. 501-514.
2. Обобщение монотонной гибридной схемы второго порядка для уравнений газовой динамики на случай нерегулярной пространственной сетки / В. С. Мингалев, И. В. Мингалев, О. В. Мингалев, А. М. Опарин, К. Г. Орлов // ЖВМ и МФ. 2010. Т. 50, № 5. С. 923-936.
3. Numerical modeling of the initial formation of cyclonic vortices at tropical latitudes / I. V. Mingalev, N. M. Astafieva, K. G. Orlov, V. S. Mingalev, O. V. Mingalev, V. M. Chechetkin // Atmospheric and Climate Sciences. 2014. Vol. 4. P. 899-906.

## **Сведения об авторах**

### **Орлов Константин Геннадьевич,**

к.физ.-мат.н., научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, orlov@pgia.ru

### **Мингалев Игорь Викторович,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mingalev\_i@pgia.ru

### **Мингалев Виктор Степанович,**

д.физ.-мат.н., профессор, заведующий сектором, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mingalev@pgia.ru

### **Чечеткин Валерий Михайлович,**

д.физ.-мат.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, г. Москва, chech@gin.keldysh.ru

### **Мингалев Олег Викторович,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mingalev\_o@pgia.ru

**Е. А. Федотова, И. В. Мингалев**

**РАСЧЕТЫ ПОТОКОВ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ В БЕЗОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ**

**Аннотация**

Изложены результаты эталонных расчетов потоков собственного излучения в дальнем, среднем и ближнем ИК-диапазонах в безоблачной атмосфере Земли на средних широтах, выполненные с высоким разрешением по частоте.

**Ключевые слова:**

*эталонные расчеты потоков излучения, собственное излучение атмосферы.*

**E. A. Fedotova, I. V. Mingalev**

**CALCULATION OF RADIATION FLUXES WITH HIGH SPECTRAL RESOLUTION IN THE CLOUDLESS ATMOSPHERE AT THE MIDDLE LATITUDES**

**Abstract**

The results of reference calculations of streams intrinsic radiation in the infrared bands in the cloudless atmosphere of the Earth at the middle latitudes with high frequency resolution, are presented.

**Keywords:**

*reference calculations of radiation fluxes, intrinsic radiation of the atmosphere.*

В данной работе изложены результаты эталонных расчетов потоков собственного излучения в дальнем, среднем и ближнем ИК-диапазонах в безоблачной атмосфере Земли на средних широтах. Расчеты выполнены с разрешением по частоте излучения  $0.001 \text{ см}^{-1}$ . При расчетах использовалось приближение горизонтальной однородной атмосферы и учитывалось молекулярное рассеяние [1-6]. Для численного решения 1-мерного по пространству уравнения переноса излучения использовался новый вариант метода дискретных ординат [7]. В расчетах использовались равномерная сетка по высоте с шагом 200 м и равномерная сетка по зенитным углам с шагом менее  $9^\circ$ . Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитывались с использованием спектроскопической базы данных HITRAN 2012.

На рисунке 1 приведены вертикальные профили температуры и концентраций основных атмосферных газов, которые использовались в расчетах. Эти профили рассчитаны по эмпирической модели NRLMSISE-00 для условий июля над северной Атлантикой на широте  $55^\circ$ .

На рисунке 2 приведены вертикальные профили объемных долей малых газовых составляющих, которые использовались в расчетах. На рис.3-8 приведены вертикальные профили скорости нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы в различных интервалах частот и вертикальные профили восходящих и нисходящих потоков энергии излучения в этих интервалах, полученные в результате проведенных расчетов при альбедо поверхности 0.1.

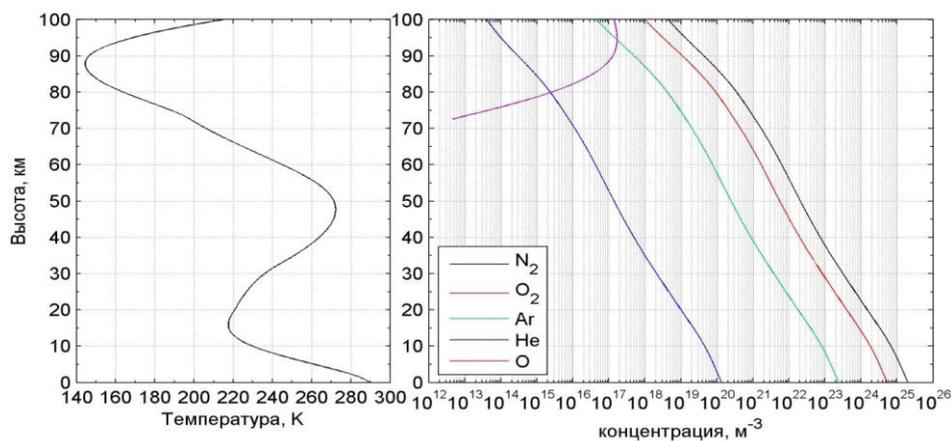


Рис.1. Вертикальный профиль температуры (слева) и вертикальные профили концентраций основных атмосферных газов (справа)

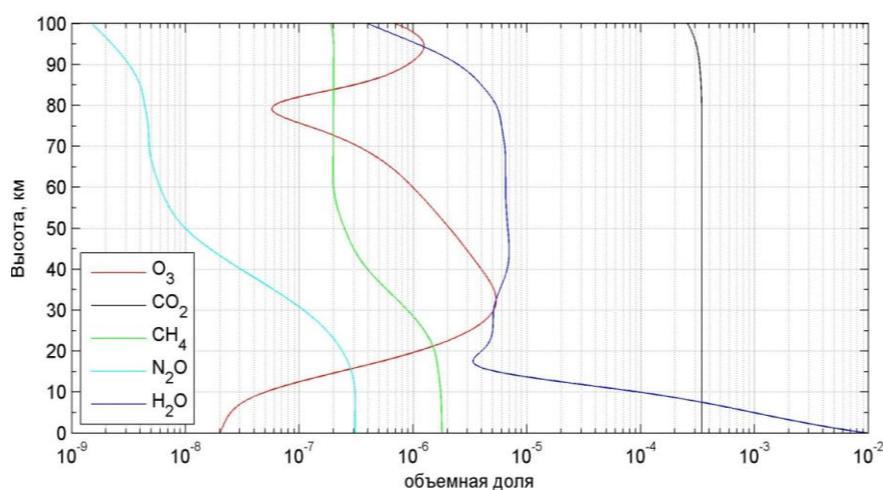


Рис.2. Вертикальные профили объемных долей малых газовых составляющих

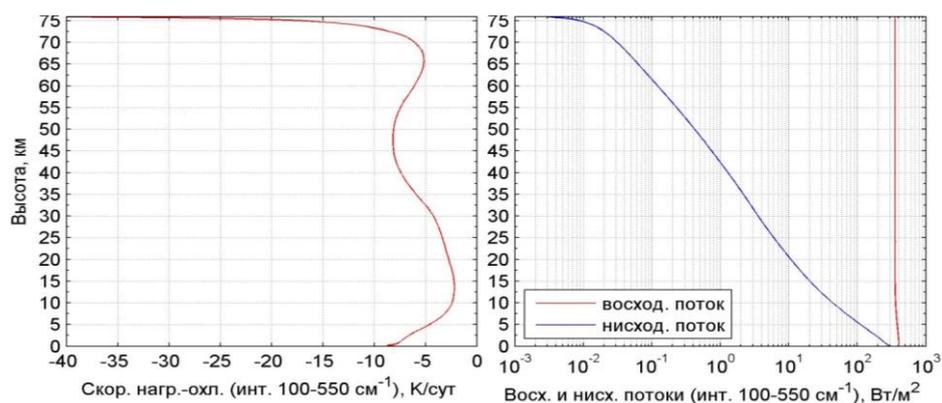


Рис.3. Вертикальные профили скорости нагрева-охлаждения воздуха и восходящего и нисходящего потоков энергии за счет переноса собственного излучения атмосферы в интервалах частот от 100 до 550  $\text{см}^{-1}$

Из рисунка 3 видно, что скорость нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы в интервале частот от 100 до 550  $\text{см}^{-1}$  существенно зависит от высоты и достигает значений -8.5 К/сут у поверхности и значений -8 К/ч на высоте 50 км (в районе стратоспаузы). Видно, что поток энергии восходящего излучения в этом интервале частот слабо зависит от высоты, а поток энергии нисходящего излучения в этом интервале частот быстро убывает с увеличением высоты. Таким образом, за счет переноса собственного излучения атмосферы в этом интервале частот происходит охлаждение атмосферного газа на высотах 0-76 км.

Из рисунке 4 видно, что скорость нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы в интервале частот от 550 до 1000  $\text{см}^{-1}$  существенно зависит от высоты и достигает значений -1.5 К/сут у поверхности и значений -2.3 К/ч на высоте 42 км и что поток энергии восходящего излучения в этом интервале частот практически не зависит от высоты, при этом поток энергии нисходящего излучения в этом интервале частот быстро убывает с увеличением высоты.

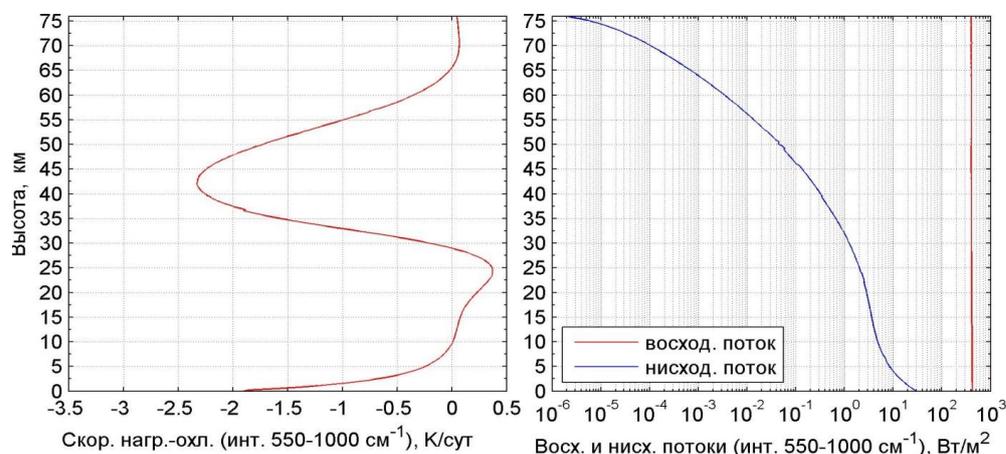


Рис.4. Вертикальные профили скорости нагрева-охлаждения воздуха и восходящего и нисходящего потоков энергии за счет переноса собственного излучения атмосферы в интервалах частот от 550 до 1000  $\text{см}^{-1}$

Из рисунка 5 видно, что скорость нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы в интервале частот от 1000 до 1500  $\text{см}^{-1}$  существенно зависит от высоты и достигает значений -2.3 К/сут у поверхности и значений -14 К/сут на высоте 46 км и что поток энергии восходящего излучения в этом интервале частот на высотах 0-10 км слабо убывает с ростом высоты, а выше практически не зависит от высоты, при этом поток энергии нисходящего излучения в этом интервале частот быстро убывает с увеличением высоты.

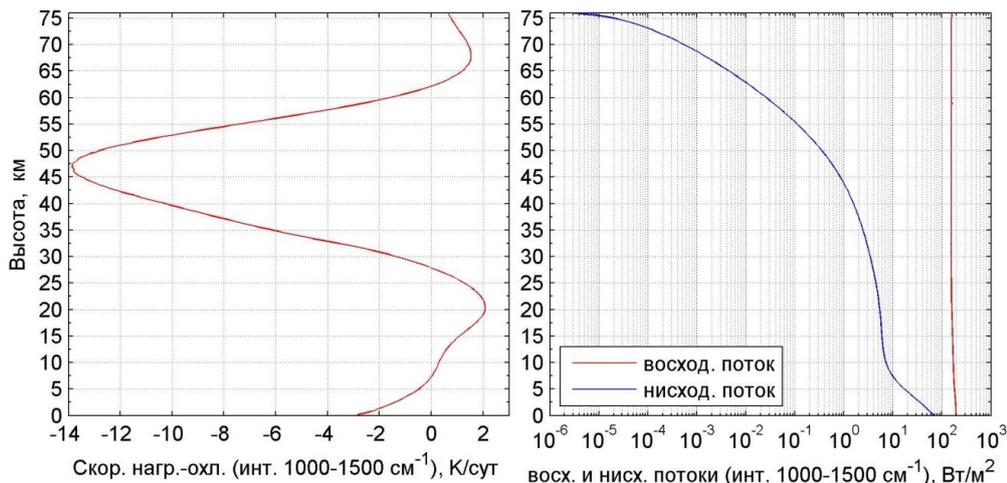


Рис.5. Вертикальные профили скорости нагрева-охлаждения воздуха и восходящего и нисходящего потоков энергии за счет переноса собственного излучения атмосферы в интервалах частот от 1000 до 1500 см<sup>-1</sup>

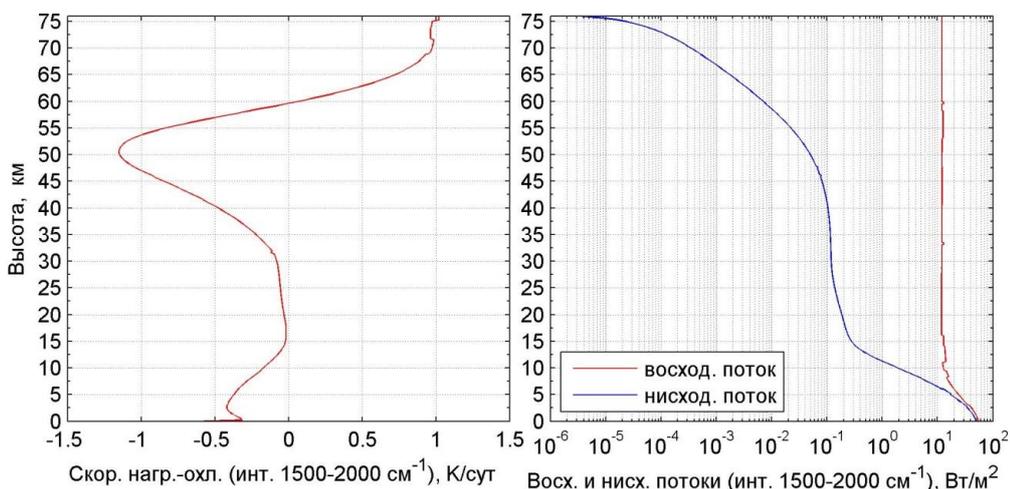


Рис.6. Вертикальные профили скорости нагрева-охлаждения воздуха и восходящего и нисходящего потоков энергии за счет переноса собственного излучения атмосферы в интервалах частот от 1500 до 2000 см<sup>-1</sup>

Из рисунка 6 видно, что скорость нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы в интервале частот от 1500 до 2000 см<sup>-1</sup> существенно зависит от высоты и достигает значений -0.4 К/сут у поверхности и значений -1.1 К/сут на высоте около 50 км. Видно, что поток энергии восходящего излучения в этом интервале частот на высотах 0-15 км убывает с ростом высоты, а выше практически не зависит от высоты, при этом поток энергии нисходящего излучения в этом интервале частот быстро убывает с увеличением высоты.

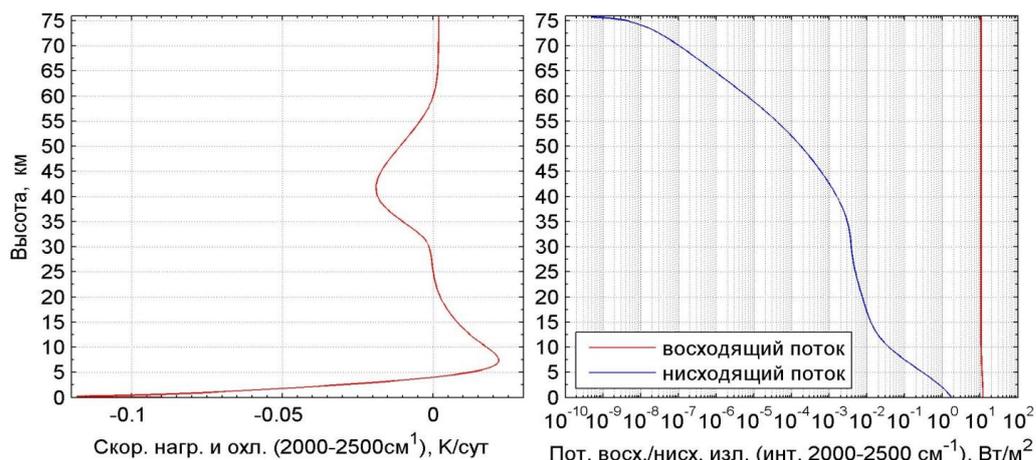


Рис.7. Вертикальные профили скорости нагрева-охлаждения воздуха и восходящего и нисходящего потоков энергии за счет переноса собственного излучения атмосферы в интервале частот от 2000 до 2500  $\text{см}^{-1}$

Из рисунка 7 видно, что скорость нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы в интервале частот от 2000 до 2500  $\text{см}^{-1}$  зависит от высоты и достигает значений  $-0.12 \text{ К/сут}$  у поверхности, а выше 5 км величина этой скорости не превышает значений  $0.02 \text{ К/сут}$ .

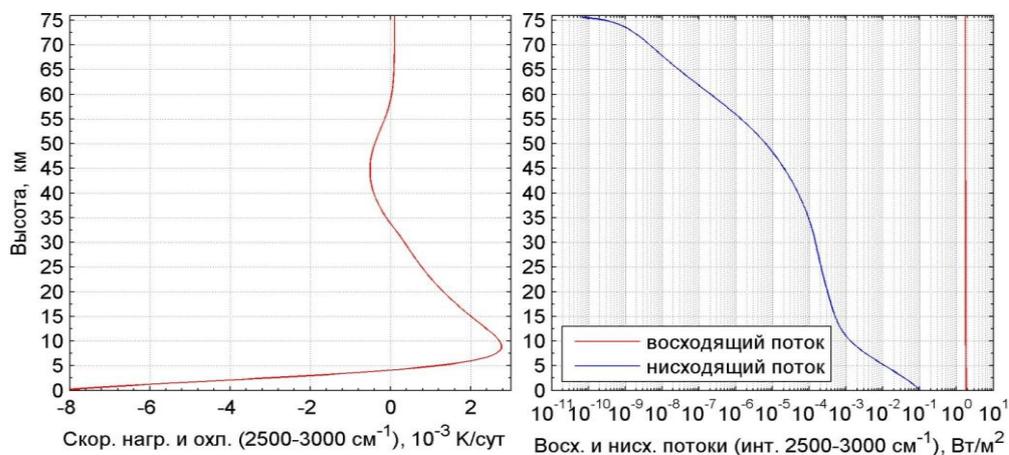


Рис.8. Вертикальные профили скорости нагрева-охлаждения воздуха и восходящего и нисходящего потоков энергии за счет переноса собственного излучения атмосферы в интервале частот от 2500 до 3000  $\text{см}^{-1}$

Из рисунка 8 видно, что скорость нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы в интервале частот от 2500 до 3000  $\text{см}^{-1}$  зависит от высоты и достигает значений  $-0.008 \text{ К/сут}$

у поверхности, на высотах от 5 до 25 км величина этой скорости не превышает значений 0.003 К/сут, а выше 25 км величина этой скорости не превышает значений 0.001 К/сут.

### **Выводы**

Таким образом, для расчета скорости нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса собственного теплового излучения атмосферы с точностью 1 % достаточно учитывать только излучение в интервале частот от 100 до 2000 см<sup>-1</sup>. Из рисунков 3-8 видно, что максимальные скорости выхолаживания атмосферы за счет собственного излучения получились на высотах верхней стратосферы и нижней мезосферы.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность Б. А. Фомину, А. В. Родину и Н. И. Игнатьеву за полезные обсуждения и консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №13-01-00063.

### **Литература**

1. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 264 с.
2. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
3. Нагирнер Д. И. Лекции по теории переноса излучения: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2001. 284 с.
4. Fomin B. A. Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer. 1995. Vol. 53. P. 663-669.
5. Franklin Evans K. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer // Journal of the Atmospheric Sciences. 1998. Vol. 55. P. 429-446.
6. Stammes K., Tsay S-Chee, Wiscombe W., Jayaweera K. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media // Applied Optics. 1988. Vol. 27, N. 12. P. 2502-2509.
7. Новый вариант метода дискретных ординат для расчета собственного излучения в горизонтально-однородной атмосфере / Н. И. Игнатьев, И. В. Мингалев, А. В. Родин, Е. А. Федотова // ЖВМ и МФ. 2015. Т. 55, № 10. С. 109-123.

### **Сведения об авторах**

#### **Федотова Екатерина Алфеевна,**

младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, godograf87@mail.ru

#### **Мингалев Игорь Викторович,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, mingalev\_i@pgia.ru

УДК 524.1

**Е. А. Маурчев**

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧАХ ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

### **Аннотация**

Представлена концепция нового программного комплекса RUSCOSMICS, основанного на GEANT4 и представляющего собой набор различных численных моделей для исследования прохождения космических лучей (КЛ) через вещество. Получены функции откликов основных детекторов излучения, а также характеристики потоков вторичных КЛ.

### **Ключевые слова:**

*космические лучи, методы Монте-Карло, взаимодействие частиц с веществом.*

**E. A. Maurchev**

## **NUMERICAL MODELING IN VARIOUS TASKS OF COSMIC RAY PHYSICS**

### **Annotation**

This paper presents a concept of a new software system RUSCOSMICS, based on GEANT4 and represents a set of various numerical models to study the passage of cosmic rays (CRs) through a substance. The functions of the main response of radiation detectors, and flow characteristics of the secondary CR have been calculated.

### **Keywords:**

*cosmic rays, Monte Carlo methods, the interaction of particles with matter.*

### **Введение**

В настоящее время исследования КЛ проводятся самыми различными способами. С самого начала это были преимущественно экспериментальные методы (шары-зонды, детекторы излучения различного типа, спутники). Одной из самых современных и надежных наземных систем регистрации космических лучей является международная сеть нейтронных мониторов. По данным этой сети определяются характеристики релятивистских солнечных протонов, зарегистрированных во время событий солнечных космических лучей (СКЛ) посредством моделирования возрастаний приземного вана вторичных космических лучей (события GLE [1, 2]). Также традиционно запускаются шары-зонды [3]. С началом компьютеризации активно развивается методика изучения распространения КЛ в веществе с помощью численного метода Монте-Карло. Нами был разработан программный комплекс RUSCOSMICS, включающий в себя модели детекторов различного типа, а также модель прохождения первичных КЛ через атмосферу Земли для получения информации о каскадах вторичных КЛ. Основой является пакет GEANT4 [4], из которого наследуются классы, отвечающие за отображение процесса взаимодействия частиц с веществом, построение геометрии, задание начальных параметров, сбор информации о ходе моделирования, состоянии частиц и др.

Самой первой задачей в данной работе являлось детальное изучение свойств детектирующего оборудования на станции космических лучей г. Апатиты. С целью решения этой задачи были созданы программные модули, представляющие собой модели нейтронного монитора (НМ), счетчиков гейгера, сцинтилляционных детекторов с геометрией и свойствами материалов, максимально приближенными к реальным.

Моделирование сцинтилляционных детекторов гамма-квантов стало необходимым, поскольку на станции космических лучей вот уже в течение нескольких лет функционирует система мониторинга рентгеновского излучения, с помощью которой были выявлены возрастания во время осадков.

Вторым этапом было создание собственного программного модуля для расчета прохождения частиц различных энергий через атмосферу Земли. Данный шаг позволил не только использовать постоянно обновляющиеся данные для моделирования, но и расширить границы применения, поскольку без труда можно менять состояние самой модели (изменять физические свойства вещества, добавлять различные поля и т. д.). Далее проводились расчеты как прохождения галактических космических лучей через атмосферу Земли, так и развития каскадов частиц во время некоторых событий GLE.

### Модель сцинтилляционного детектора NaI

В детекторах подобного типа энергия и интенсивность гамма-квантов определяются с помощью вторичных заряженных частиц (электронов и позитронов), которые возникают в результате взаимодействий самих гамма-квантов с веществом. Как уже было сказано выше во введении, в основе всех моделей комплекса лежит метод Монте-Карло и для выбора некоторого значения  $x \in (x_1, x_2)$  из нормализованной функции плотности вероятности  $f(x)$ :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x) g_i(x) \quad (1)$$

где  $\alpha_i > 0$  – вероятность выборки нормированной функции плотности вероятности  $f_i(x)$  и  $0 \leq g_i(x) \leq 1$ . Тогда, произведя выборку случайного целого с вероятностью, пропорциональной  $\alpha_i$ , и выбрав значение  $x_0$  из распределения  $f_i(x)$ , можно рассчитать  $x = x_0$  с вероятностью  $g_i(x_0)$ . В случае отклонения значения схема расчета повторяется сначала. Подробное математическое описание модели является слишком громоздким и здесь не представлено. С помощью вышеописанной концепции были смоделированы три сцинтилляционных детектора с геометрическими размерами 2x6.3 см и 10x15 см. В результате моделирования прохождения моноэнергичных пучков гамма-квантов через сцинтилляционные детекторы с описанной выше геометрией получены эффективности регистрации, представленные на рис.1.

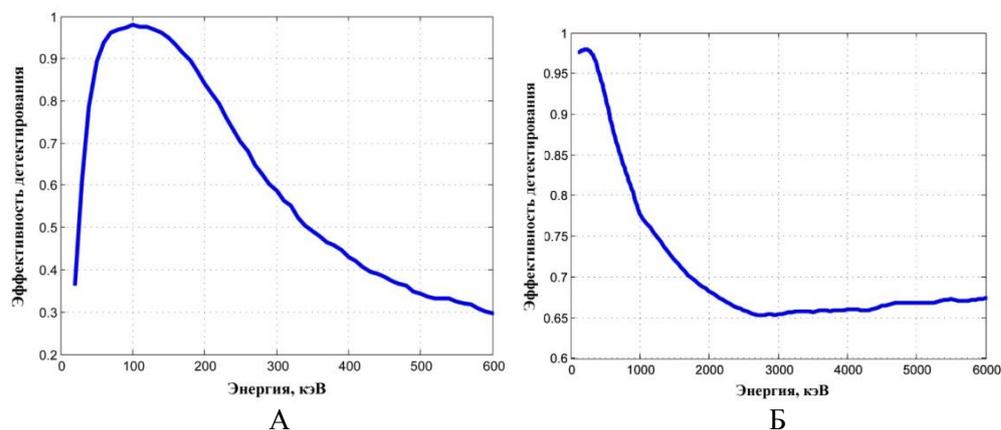


Рис.1. Эффективности детектирования гамма-квантов, полученные в результате моделирования взаимодействий частиц со сцинтилляционными детекторами типоразмерами 2x6.3 см (А) и 10x15 см (Б)

### Модель нейтронного монитора

Геометрические параметры модели идентичны параметрам реального НМ, внешний вид модели во фронтальной плоскости и трекинг визуализированы на рис.2, полученная в результате моделирования функция отклика представлена на рис.3. Поток моноэнергичных первичных нейтронов падает перпендикулярно на верхнюю плоскость детектора, распределение частиц носит равномерный характер, количество частиц в потоке задавалось равным 500 тыс. на одно значение энергии.

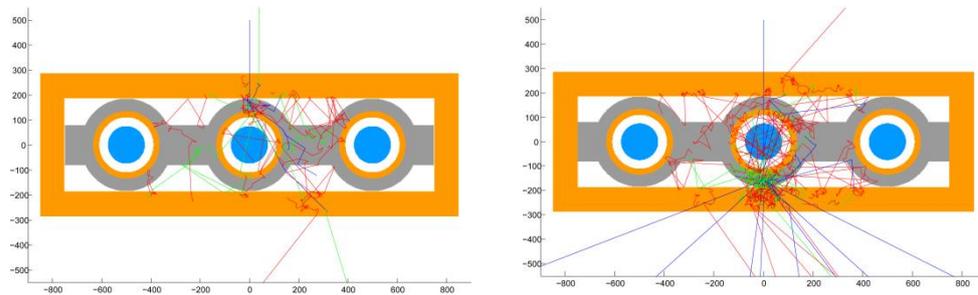


Рис.2. Визуализация фронтальной проекции модели одной секции НМ. Сверху на полиэтилен падают нейтроны с энергиями 300 МэВ (справа) и 10 ГэВ (слева) соответственно. В результате неупругого столкновения со свинцом рождается каскад нуклонов, здесь отображены только нейтроны. Различными цветами обозначены энергетические диапазоны частиц. Синим цветом – с энергией выше 100 МэВ; зеленым – от 100 кэВ до 100 МэВ; красным – ниже 100 кэВ. Хорошо видны процессы образования каскада, дрейфа нейтронов, множества упругих столкновений, остановки и поглощения. Цифры на осях позволяют оценить линейные размеры установки, единицы измерения заданы в миллиметрах

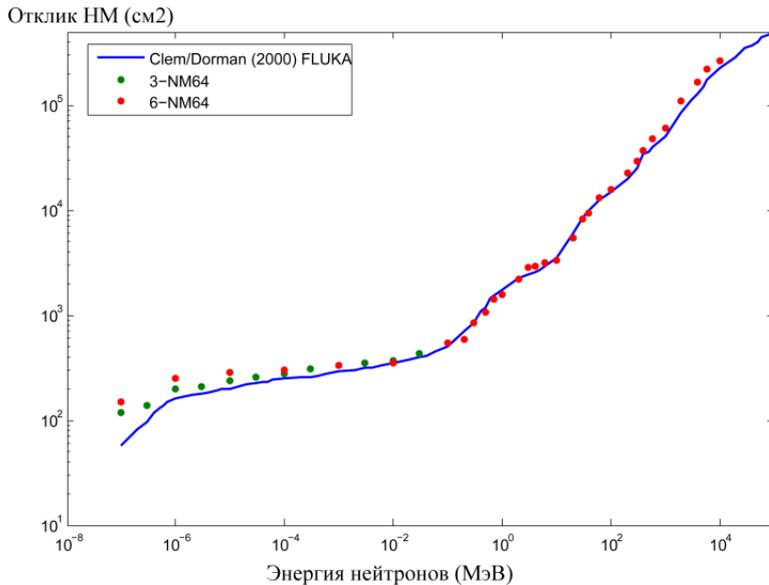


Рис.3. Функция отклика НМ, полученная в результате моделирования прохождения потоков моноэнергичных нейтронов через систему детектора. Проводится сравнение с полученной ранее [5] с помощью пакета FLUKA, видно хорошее совпадение

### Моделирование прохождения КЛ через атмосферу Земли

Одной из самых сложных в программном комплексе RUSCOSMICS является модель для расчета прохождения первичных протонов КЛ через атмосферу Земли и исследования образований каскадов вторичных КЛ.

Для построения модели применялась концепция так называемой «плоской» геометрии, когда выделяется столб атмосферы Земли на заданной широте и долготе, задается его высота и длина граней, а также вычисляются физические параметры каждого слоя (процентное соотношение масс составляющих элементов, плотность, давление и температура) с помощью NRLMSISE-00 [6]. На границе определяется модельный источник частиц с заданной интенсивностью и спектральной характеристикой. При прохождении частиц через вещество атмосферы рассчитываются параметры каскадов вторичных КЛ. Модельные данные сравниваются с экспериментальными, полученными в результате запуска шаров-зондов.

### Заключение

В результате моделирования прохождения потока нейтронов через нейтронный монитор была получена функция отклика, а также детально изучены свойства замедлителя и свинцового генератора. Результаты сравнивались с работами, проводимыми ранее и в настоящее время, показано хорошее согласие в вычислениях. Современные сечения взаимодействий, используемые при моделировании, позволили более точно изучить функцию отклика нейтронного монитора в диапазоне энергий от 10 МэВ до эпитепимальных. Параллельно этим расчетам проводилось моделирование

множественности в нейтронном мониторе, результаты данной работы подтвердили предположение, что феномен вызывается не единственной частицей, попадающей в свинцовый генератор НМ, а целым облаком частиц.

Результатами вычислений NaI-детекторов различной геометрии с помощью GEANT4 являются их функции отклика. Подобные работы проводились и ранее, но наши методы отличаются современным подходом и совершенно новой концепцией, позволяющей учесть больше факторов при расчете прохождения частиц через вещество.

Результатом работы по моделированию прохождения первичных КЛ через атмосферу Земли стала база данных энергетических спектров вторичного космического излучения для различных высот. Данные расчеты могут применяться как для оценки скорости ионизации при вычислении эквивалентной дозы, так и для детального исследования развития каскадов и поиска новых особенностей во время GLE. Работы подобного рода проводились и другими исследователями с помощью PLANETOCOSMICS, результаты нашего моделирования сверялись с ними, а также с экспериментальными данными, полученными из данных полетов шаровозондов, с которыми они имеют хорошее согласие.

### **Литература**

1. Vashenyuk E. V., Balabin Yu. V., Gvozdevsky B. B. Relativistic solar cosmic ray dynamics in large ground level events // Proc. 21-st ECRS (Kosice, Slovakia, 9-12 September, 2008, Inst. of Exp. Phys., Slovak Academy of Sci.). Kosice, 2009. P. 264-268.
2. Shea M. A., Smart D. F. Possible evidence for a rigidity dependent release of relativistic protons from the solar corona // Space Sci. Rev. 1982. 32. P. 251-271.
3. Cosmic ray induced ion production in the atmosphere / G. A. Bazilevskaya et al. // Space Sci Rev. 2008. 137.
4. Geant4-a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 506 (3): 250. Bibcode:2003NIMPA.506..250A, doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
5. Clem J. M., Dorman L. I. Neutron monitor response function // Space Science Rev. 2000. 93. P. 335-359.
6. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / J. M. Picone, A. E. Hedin, D. P. Drob, A. C. Aikin // J. Geophys. Res. 2002. 107(A12). P. 1468, doi:10.1029/2002JA009430.

### ***Сведения об авторе***

**Маурчев Евгений Александрович,**  
младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, maurchev@pgia.ru

УДК 533.95

**И. В. Мингалёв, П. В. Сецко**

## **РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

### **Анотация**

Представлены описание комплекса программ для расчёта траекторий заряженных частиц в магнитосфере Земли, а также результаты тестовых расчетов.

### **Ключевые слова:**

*траектории заряженных частиц, магнитосфера Земли.*

**I. V. Mingalev, P. V. Setsko**

## **CALCULATION OF TRAJECTORIES OF CHARGED PARTICLES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE**

### **Abstract**

A description of a programs for calculation of the charged particles trajectories in the Earth's magnetosphere is presented.

### **Keywords:**

*Earth's magnetosphere, trajectories of charged particles.*

### **Введение**

В данной работе излагается описание программного комплекса для расчета траекторий заряженных частиц в земной магнитосфере и результаты работы этого комплекса. Магнитное поле, используемое для вычислений, в земной магнитосфере рассчитывается по эмпирической модели Цыганенко, а электрическое поле считается суммой поля коротации и потенциального поля, потенциал которого считается постоянным вдоль силовых линий магнитного поля и передается из солнечного ветра и земной ионосферы. Важная особенность созданного комплекса программ состоит в том, что расчёт траектории одной частицы максимально оптимизирован с целью снижения вычислительных затрат и позволяет рассчитывать траектории большого числа частиц даже на персональном компьютере.

До недавнего времени вычислительные ресурсы и существующие численные методы расчета траектории частиц не позволяли рассчитывать траектории достаточно большого числа частиц, чтобы с помощью моделирования изучить выше перечисленные физические процессы в магнитосфере. В ПГИ Мингалевым О. В. и Мингалевым И. В. был разработан новый метод расчёта траектории частицы, который при расчёте траектории замагниченных частиц в Земной магнитосфере даёт выигрыш на 3-4 порядка по сравнению с другими методами [1]. Также за последние годы резко выросли вычислительные мощности компьютерной техники за счёт возможности параллельных вычислений как на центральных, так и на графических процессорах. В свете вышеизложенных фактов появилась возможность создать комплекс программ, который с помощью массивно параллельных вычислений на графических процессорах позволяет рассчитывать в земной магнитосфере траектории очень большого числа частиц (более  $10^{10}$ ). А это, в свою очередь,

позволит изучить с помощью численного моделирования много важных физических процессов в Земной магнитосфере. Представленный в этой работе вариант комплекса является первым шагом в этом направлении.

### **Программный комплекс**

Программный комплекс состоит из двух частей. Первая часть включает в себя набор подпрограмм, предназначенный для расчета по модели Цыганенко силовых линий магнитного поля и их визуализации. Визуализация силовых линий магнитного поля необходима для физического анализа конфигурации магнитного поля в земной магнитосфере при заданных гелио-геофизических условиях. Этот анализ необходим для правильной интерпретации результатов расчетов траекторий заряженных частиц.

Вторая часть включает в себя набор подпрограмм, которые вычисляют магнитное поле в магнитосфере по модели Цыганенко версии 2008 г. [2-4], и подпрограмму, которая вычисляет электрическое поле в магнитосфере по методике, описанной в работе [5]. Электрическое поле считается суммой электрического поля коротации, которое возникает вследствие электромагнитной индукции из-за вращения земного магнитного диполя, и внешнего электрического поля, передающегося из солнечного ветра. Также вторая часть программного комплекса включает в себя программу расчета траектории частицы в магнитосфере, в которой вызываются выше упомянутые подпрограммы расчета магнитного и электрического полей. Входными параметрами являются начальные координаты частицы в GSM-системе координат и параметры: номер года, номер дня, время суток, индекс геомагнитной активности, параметры солнечного ветра. При расчёте траектории частицы используется вызов подпрограммы, вычисляющей магнитное поле по модели Цыганенко в заданной точке пространства в GSM-системе координат.

В программе осуществляется выбор шага интегрирования по времени уравнений движения частицы и послойный переход по алгоритму до тех пор, пока частица не вылетит из области расчета либо в ионосферу, либо за внешнюю границу магнитосферы.

### **Результаты тестовых расчётов**

На рисунке 1 изображены несколько силовых линий магнитного поля в земной магнитосфере в GSM-системе координат, рассчитанные по модели Цыганенко для даты 16 декабря 1997 г. UT = 12:00 и условий, когда межпланетное магнитное поле (ММП) в системе GSM имеет Z-компоненту величиной -3 нТл (северное направление ММП) и равные нулю X- и Y-компоненты, солнечный ветер имеет только X-компоненту, равную -500 км/с, и равные нулю Y- и Z-компоненты, давление в солнечном ветре составляет 3 нПа, а значение *Dst*-индекса равно -20. Линии расположены в ночном секторе магнитосферы. Линии выходят с поверхности Земли из точек, которые в географической системе координат имеют долготу  $170^{\circ}$  и широты начиная с  $68^{\circ}$  и заканчивая  $71.25^{\circ}$  с шагом  $0.25^{\circ}$ . Видно, что силовые линии сильно вытягиваются в направлении, противоположном направлению на Солнце, и образуют так называемый хвост магнитосферы.

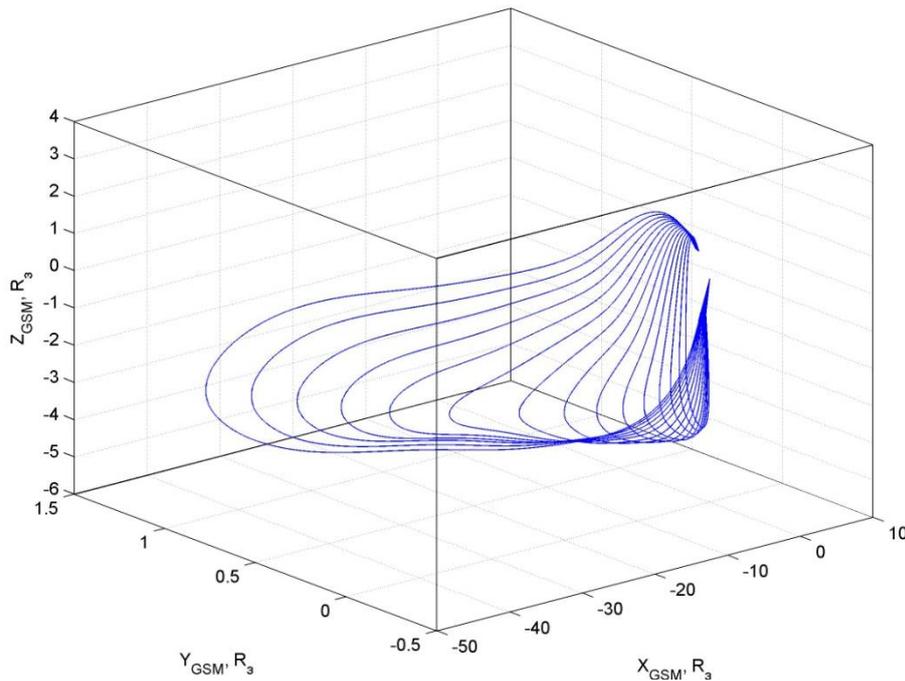


Рис.1. Силовые линии магнитного поля в земной магнитосфере на ночной стороне

На рисунке 2 приведена траектория протона, рассчитанная с помощью созданного комплекса программ для следующих начальных условий. Координаты в начальный момент в GSM-системе имели значения в земных радиусах:

$$x_0 = -12; y_0 = -2; z_0 = 0.$$

Компоненты скорости протона в начальный момент в GSM-системе вычислялась по следующим формулам:

$$V_x = -2 V_T b_x + 0.2 V_T, V_y = -2 V_T b_y - 0.5 V_T, V_z = -2 V_T b_z - 0.1 V_T,$$

в которых  $V_T = 978.71$  км/с – тепловая скорость протона, соответствующая энергии 5 КэВ, а  $b_x, b_y, b_z$  – компоненты единичного вектора вдоль магнитного поля в GSM-системе. Такой вариант начальной скорости протона соответствует большой продольной скорости и небольшой поперечной скорости.

Для вычисления геомагнитного дипольного угла наклона в радианах задана дата 16 декабря 1997 г. 21:00 UTC. Давление солнечного ветра 3 нПа,  $Dst$ -индекс 20, а скорость солнечного ветра в координатах GSE в км/с покомпонентно равна:

$$V_{GSEX} = -304.0, \quad V_{GSEY} = -16.0, \quad V_{GSEZ} = 4.0.$$

Количество расчетных шагов на траектории равняется 300 000, а время полета протона равняется 1180 сек. Видно, что протон вначале движется примерно вдоль силовой линии, а затем переходит на траекторию в виде сильно закрученной спирали и много раз пересекает токовый слой, при этом возвращаясь к Земле и снова отдаляясь от нее. При этом координаты протона по оси  $X$  меняются более чем на 30 земных радиусов, по оси  $Y$  – примерно на 10 земных радиусов, а по оси  $Z$  – примерно на 6 земных радиусов.

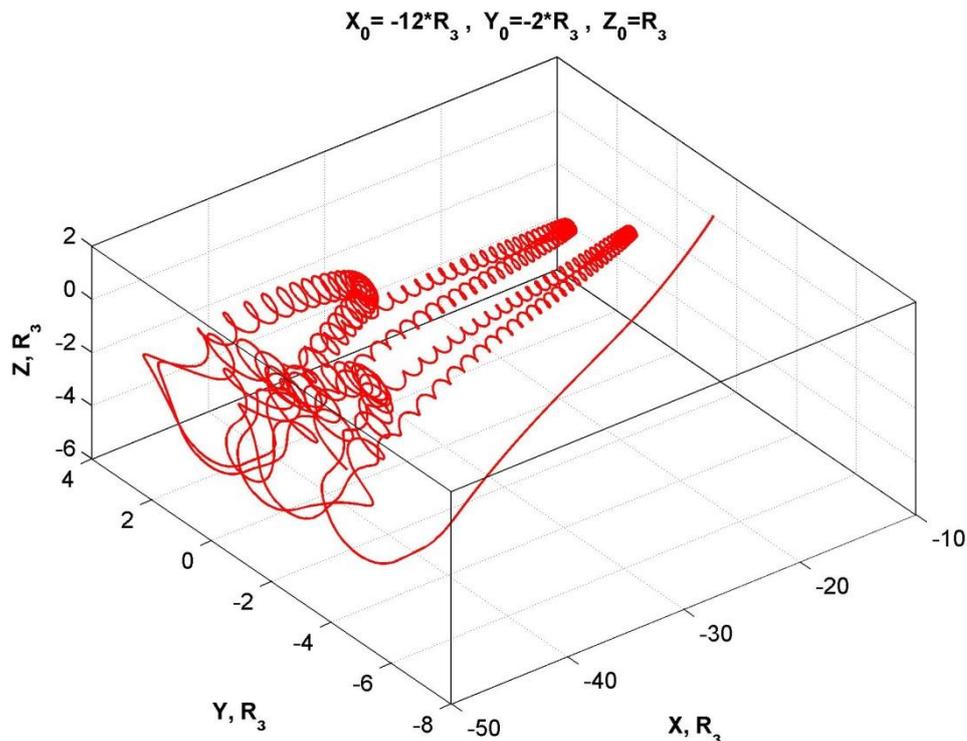


Рис.2. Траектории протона при заданных начальных условиях

На рисунке 3 приведена траектория протона, рассчитанная с помощью созданного комплекса программ для тех же начальных условий, что и на рис.2, но координаты в начальный момент в GSM-системе имели значения в земных радиусах:

$$x_0 = -9; y_0 = -1; z_0 = 0.$$

Количество расчетных шагов на траектории равняется 200 000, а время полета протона равняется 775.79 сек. Видно, что протон вначале движется примерно вдоль силовой линии, а затем переходит на траекторию в виде сильно закрученной спирали и несколько раз пересекает токовый слой.

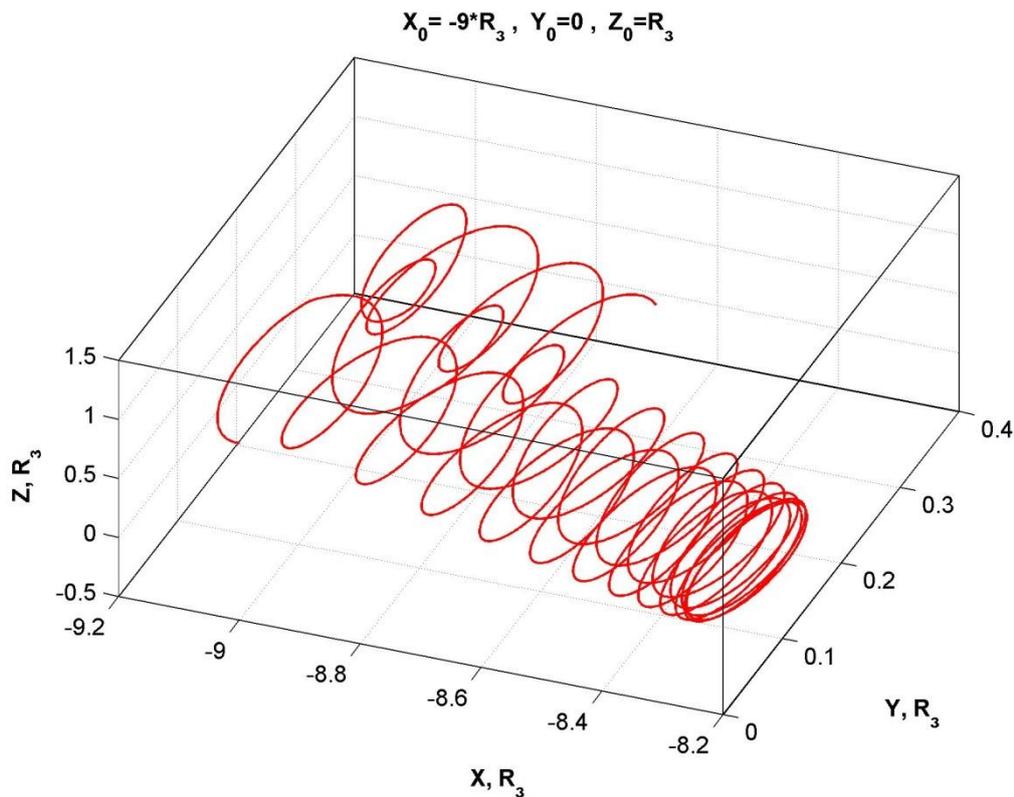


Рис.3. Траектории протона при заданных начальных условиях

### Заключение

Полученные результаты тестовых расчетов силовых линий магнитного поля и траекторий протонов в хвосте земной магнитосферы с помощью созданного программного комплекса показали, что созданный комплекс программ работает правильно и выдает физически корректные результаты.

В дальнейшем комплекс программ планируется использовать как составную часть модели, в которой с помощью расчета траекторий большого числа заряженных частиц рассчитываются распределения параметров магнитосферной плазмы. Эта модель позволит на новом уровне изучить многие важные физические процессы в магнитосфере Земли, в частности динамику и положение токового слоя в хвосте земной магнитосферы, положение и динамику ударной волны и плазмопаузы магнитосферы, а также распределение токов, текущих в плазмопаузе.

### Литература

1. Бородачев Л. В., Мингалев И. В., Мингалев О. В. Дрейфовый алгоритм расчёта движения заряда в дарвиновской модели плазмы // ЖВМ и МФ. 2003. Т. 43, № 3. С. 467-480.
2. Tsyganenko N. A., Sitnov M. I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // Ibid. 2005. Vol. 110, doi: 10.1029/2004JA010798.

3. Tsyganenko N. A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // Ibid. 2002. Vol. 107, doi: 10.1029/2001JA000219.
4. Tsyganenko N. A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations // Ibid. 2002. Vol. 107, doi: 10.1029/2001JA000220.
5. Delcourt D. C., Sauvau J. A., Pedersen A. Dynamics of single-particle orbits during substorm expansion phase // Journal of Geophysical Research. 1990. Vol. 95, No. A12. P. 20853-20865.

*Сведения об авторах*

**Мингалёв Игорь Викторович**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт,  
г. Апатиты, mingalev\_i@pgia.ru

**Сецко Павел Владимирович,**

oberon4eg@mail.ru

**П. А. Васильев, А. И. Клопова, К. А. Артеменко, Д. В. Калугин,  
М. В. Клименко, А. Т. Карпачев, В. В. Клименко, К. Г. Ратовский,  
Н. А. Коренькова, А. Ю. Белинская, А. Е. Степанов**

**ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ОПИСАНИЯ ЭМПИРИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ  
ЗИМНЕГО НОЧНОГО ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА  
В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

**Аннотация**

Представлено сравнение результатов эмпирической модели зимнего ночного главного ионосферного провала (ГИП), разработанной в ИЗМИРАН, с международной справочной моделью ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) и данными наблюдений на трех широтных цепочках станций в различных долготных секторах (североамериканском, европейском и сибирском) северного полушария в минимуме солнечной активности. Отмечаются преимущества использования эмпирической модели ГИП по сравнению с моделью IRI для описания поведения электронной концентрации в *F*-области субавроральной ионосферы.

**Ключевые слова:**

*главный ионосферный провал, F2-слой, ионосфера, foF2, распространение радиоволн.*

**P. A. Vasiljev, A. I. Klopova, K. A. Artemenko, D. V. Kalugin,  
M. V. Klimenko, A. T. Karpachev, V. V. Klimenko, K. G. Ratovsky,  
N. A. Korenkova, A. Yu. Belinskaya, A. E. Stepanov**

**CHECKING OF THE ADEQUATE DESCRIPTION BY EMPIRICAL MODELS  
OF THE WINTER NIGHTTIME MAIN IONOSPHERIC TROUGH DURING SOLAR  
ACTIVITY MINIMUM**

**Abstract**

It is presented a comparison of the results of an empirical model of the winter nighttime main ionospheric trough (MIT) developed in IZMIRAN with International Reference Ionosphere (IRI) model and observations on three latitudinal chain of stations in different longitudinal sectors (North American, European and East Siberian) in Northern Hemisphere during solar activity minimum. It has been shown and discussed the advantages of using of the MIT empirical model compared with the IRI model for describing the behavior of the electron density in the *F* region of sub-auroral ionosphere.

**Keywords:**

*main ionospheric trough, F2 layer, ionosphere, foF2, radiowave propagation.*

**Введение**

Изучение динамики высокоширотной ионосферы является актуальным разделом геофизики, имеющим большое прикладное значение, особенно для России. Распределение и динамика различных ионосферных параметров, в частности электронной концентрации, на авроральных и субавроральных широтах оказывают влияние на условия прохождения радиосигналов, что важно для работы систем связи воздушных и морских судов, а также геопозиционирования. Увеличение темпов развития программ по освоению Арктики и наметившийся рост в использовании высоких широт для перевозки

пассажирам воздушным транспортом придают большое значение решению задачи моделирования динамики высокоширотной ионосферы и делают решение этой задачи одним из приоритетных направлений исследований ионосферы в России.

Главный ионосферный провал (ГИП), расположенный между среднеширотной и высокоширотной ионосферой и наблюдающийся преимущественно зимой в ночные часы, представляет собой структуру, в которой имеет место резкое понижение электронной концентрации в узком интервале субавроральных широт вблизи экваториальной границы аврорального овала. ГИП оказывает существенное влияние на все ионосферные параметры, так как отклонение электронной концентрации от среднего значения может достигать одного порядка. Форма и локализация ГИП являются предметом интенсивных исследований, поскольку эти характеристики существенно влияют на надежность радиосвязи на субавроральных и высоких широтах: ведь именно появление ГИП является одной из основных причин срыва радиосвязи на таких трассах (см., например, [1]).

Широко распространённая на сегодняшний день международная справочная модель IRI (International Reference Ionosphere), основанная на обобщении данных наземного и спутникового зондирования ионосферы, а также нескольких радаров некогерентного рассеивания [2], недостаточно точно описывает динамику и широтно-долготную структуру распределения ионосферных параметров в высоких широтах [3, 4], так как в модели IRI структура ГИП специально не выделяется. Единственной из разработанных до настоящего времени эмпирических моделей, в которой приближенно отражена конфигурация ГИП, является Справочная модель ионосферы (СМИ) [5]. К сожалению, эта модель является в настоящий момент труднодоступной для широкого использования, в том числе и для авторов настоящей работы. В данной работе приведены результаты тестирования модели ГИП [6], разработанной в ИЗМИРАН. Эта модель может быть использована для долгосрочного прогноза поведения субавроральной ионосферы.

#### **Методы и подходы**

В основе модели ГИП лежат данные спутников «Космос-900», «Интеркосмос-19» и СНАМР. К настоящему моменту модель позволяет описать распределение критической частоты  $F_2$ -слоя зимней ионосферы,  $foF_2$ , на всех долготах в ночные часы (с 18:00 до 06:00 LT) для спокойных геомагнитных условий ( $K_p=2$ ) в диапазоне широт от  $45^\circ$  до  $75^\circ$  северной широты и от  $40^\circ$  до  $80^\circ$  южной широты при любом уровне солнечной активности ( $F_{10.7}$  от 70 до 200). Модель недавно была размещена на веб-сайте ИЗМИРАН (<http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/>) и в настоящее время находится на стадии обновления. В рамках настоящей работы проводилось тестирование модели ГИП путем ее сравнения с моделью IRI и данными наблюдений. Для сравнения был выбран зимний период спокойных геомагнитных условий 2009-2010 гг., соответствующий низкому уровню солнечной активности  $F_{10.7}=80$ . Проведено усреднение данных наблюдений по 28-дневному интервалу с 12 декабря 2009 г. по 7 января 2010 г. В качестве источников данных наблюдений были выбраны несколько ионозондов на трех широтных цепочках станций: североамериканской (Millstone Hill ( $43^\circ$  с. ш.,  $288^\circ$  в. д.), Goose Bay ( $53^\circ$  с. ш.,  $300^\circ$  в. д.), Sondrestrom ( $67^\circ$  с. ш.,  $309^\circ$  в. д.), Thule ( $76^\circ$  с. ш.,  $297^\circ$  в. д.)), европейской (Калининград ( $55^\circ$  с. ш.,  $21^\circ$  в. д.), Tromso ( $70^\circ$  с. ш.,

19 ° в. д.) и восточносибирской (Иркутск (52 ° с. ш., 105 ° в. д.), Новосибирск (55 ° с. ш., 82 ° в. д.), Якутск (62 ° с. ш., 130 ° в. д.), Норильск (69 ° с. ш., 88 ° в. д.)). Значения  $foF2$  по данным ионозондов на территории России были получены посредством ручной обработки ионограмм, а значения  $foF2$  для североамериканских и европейской станций были взяты нами с помощью двух интернет-ресурсов: SPIDR (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>) и GAMBIT (<http://giro.uml.edu/GAMBIT>), на которых представлены результаты автоматической обработки ионограмм. Результаты расчетов по модели IRI были получены с помощью онлайн-версии модели IRI-2012 ([http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html)).

## Результаты

Результаты сравнения двух моделей с данными наблюдений приведены ниже в виде суточных вариаций  $foF2$  (рис.1) и широтных разрезов  $foF2$  в различных долготных секторах для каждой выбранной цепочки станций в различные моменты местного времени (рис.2-4).

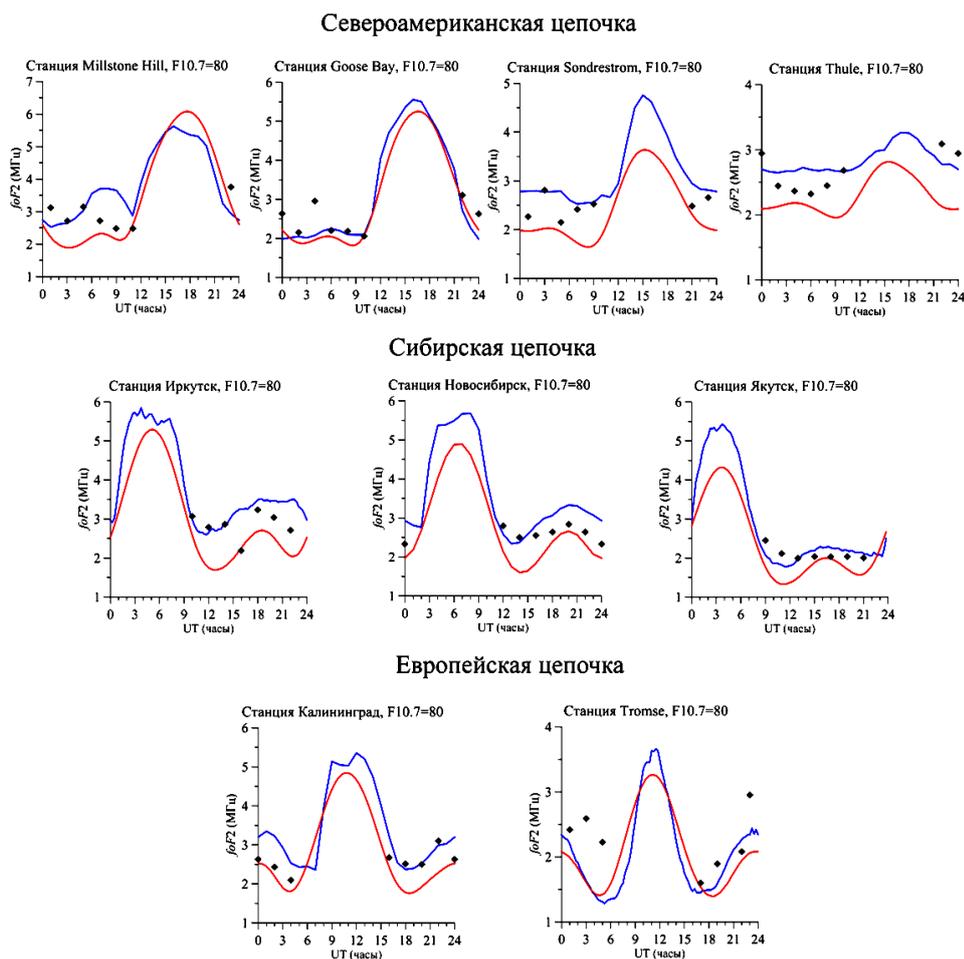


Рис.1. Сравнение суточных вариаций  $foF2$ , полученных по данным наблюдений (синие линии) и с использованием модели IRI (красные линии) и модели ГИП (чёрные ромбы)

### Широтный разрез (F10.7=80, 20° в.д.)

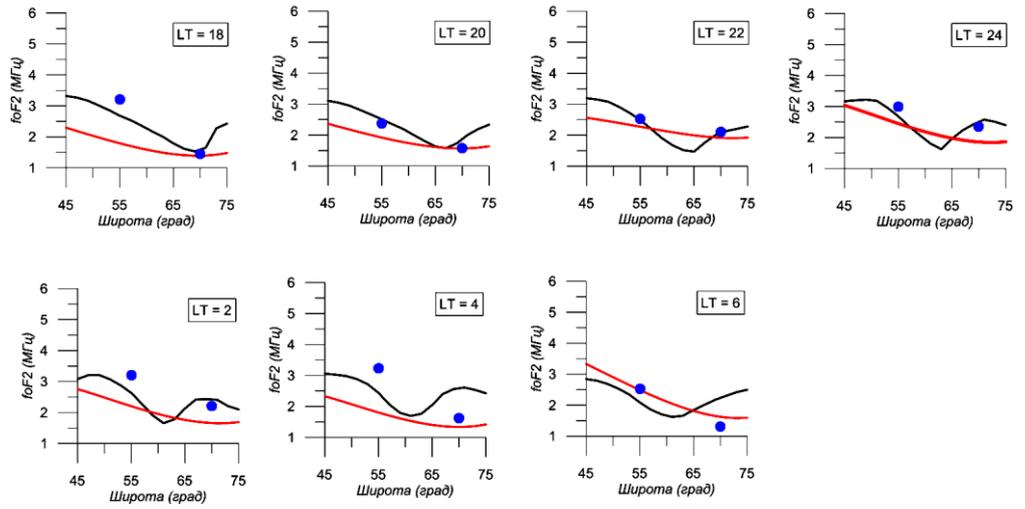


Рис.2. Широтные профили  $foF2$ , полученные по данным наблюдений на станциях Калининград и Tromsø (синие кружки) и с использованием моделей IRI (красные линии) и ГИП (чёрные линии) на 20° в. д

### Широтный разрез (F10.7=80, 105° в.д.)

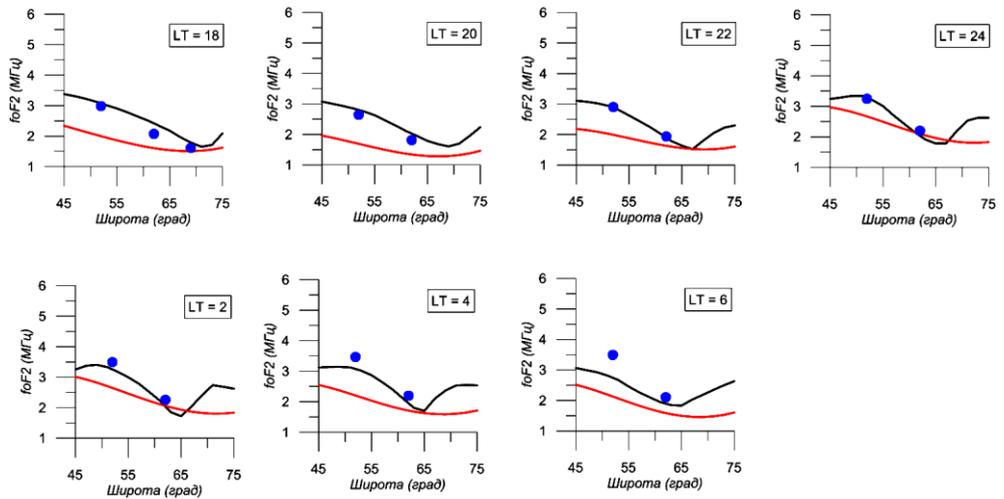


Рис.3. То же, что и на рис.2, на 105° в. д.  
Кружками показаны данные наблюдений на станциях Иркутск, Якутск и Норильск

### Широтный разрез (F10.7=80, 60° з.д.)

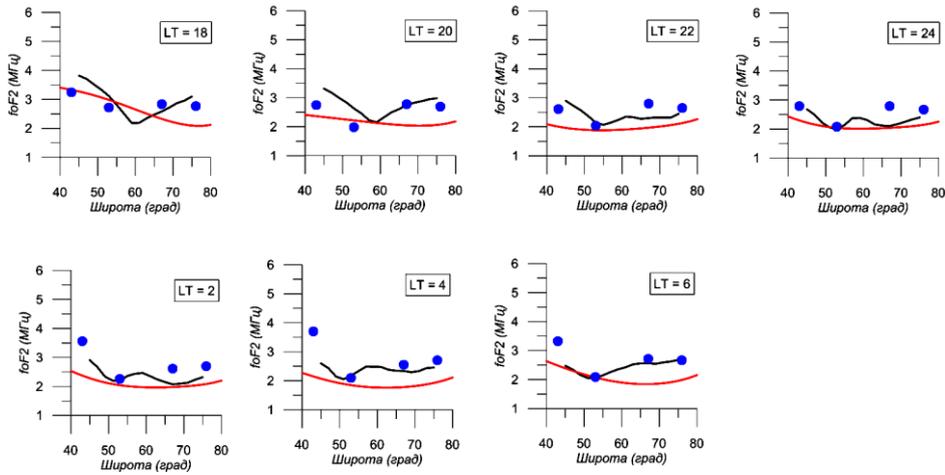


Рис.4. То же, что и на рис.2, на 60° з. д.  
Кружками показаны данные наблюдений, полученные на станциях Millstone Hill, Goose Bay, Sondrestrom и Thule

Ночные значения  $foF2$ , полученные в модели ГИП, лучше соответствуют суточной вариации, полученной по данным наблюдений, чем по результатам модели IRI. Следует заметить, что это справедливо не только для станций восточносибирской и европейской цепочек, но и для североамериканских станций, которые в свое время легли в основу модели IRI. Несмотря на некоторое снижение точности модели ГИП при описании значений  $foF2$  на североамериканских станциях, значения  $foF2$ , полученные в модели ГИП, ближе к данным наблюдений, чем в модели IRI и лучше воспроизводят морфологию суточного хода в неосвещенное время на отдельно взятых субавторальных и высокоширотных станциях.

Из приведенных широтных профилей  $foF2$  видно, что модель ГИП лучше согласуется с наблюдениями, чем модель IRI. Особенно ярко это проявляется в области экваториальной стенки главного ионосферного провала, которая четко проявляется в модели ГИП и по данным наблюдений, но практически отсутствует в модели IRI. В результатах, полученных по модели ГИП, в отличие от модели IRI, также четко проявляется полярная стенка провала и полярный пик, что согласуется с известными основными морфологическими особенностями распределения электронной концентрации в  $F$ -области высокоширотной ионосферы [7]. К сожалению, эту особенность невозможно проверить по данным наблюдений для большинства цепочек станций в связи с отсутствием достаточного количества высокоширотных станций. Единственными долготами, на которых имеется достаточное количество данных наблюдений в высокоширотной области, является американский долготный сектор. При этом в данных наблюдений четко проявляется полярная стенка провала и полярный пик, что очевидным образом согласуется с результатами расчетов модели ГИП. Можно также отметить наилучшее согласие результатов расчетов модели ГИП с данными наблюдений с 20:00 до 02:00 LT.

Кроме того, немаловажной особенностью в поведении ГИП является зависимость его формы и глубины от рассматриваемой географической долготы. Эта зависимость практически отсутствует в результатах расчетов по модели IRI. Модель же ГИП четко выявляет основные особенности долготной зависимости экваториальной стенки и глубины провала. Так, в восточносибирском и европейском долготных секторах экваториальная стенка ГИП занимает очень большую область широт и достаточно пологая, а в американском долготном секторе ГИП проявляется менее четко. В дальнейшем планируется провести более детальное сравнение основных характеристик ГИП в зависимости от долготы и местного времени, полученных по данным наблюдений и по моделям IRI и ГИП. Также необходимо провести исследование влияния солнечной активности на форму и положение ГИП на разных долготах.

### **Заключение**

Проведено тестирование эмпирической модели ГИП для зимних ночных условий в северном полушарии для минимума солнечной активности. Показано, что модель ГИП более корректно, по сравнению с моделью IRI, описывает широтную структуру субавроральной и высокоширотной ионосферы и зависимость конфигурации ГИП от долготы. Медианная модель ГИП построена для типичных средних геомагнитных условий и предназначена, в первую очередь, для долгосрочного прогноза ионосферы субавроральных широт. Эта модель применима для любого уровня солнечной активности и размещена на веб-сайте ИЗМИРАН (<http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit>).

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 14-05-00788 (Карпачев А. Т., Ратовский К. Г.) и №15-35-20364 (Клименко М. В., Клименко В. В.). Работа проводилась в рамках проекта "Физические механизмы формирования реакции верхней атмосферы и ионосферы на процессы в нижней атмосфере и на поверхности Земли" (Государственное задание Министерства образования и науки РФ, конкурсная часть, задание № 3.1127.2014/К).

### **Литература**

1. Благовещенский Д. В., Жеребцов Г. А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование ВЧ радио каналов. М.: Наука, 1987. 130 с.
2. Bilitza D., Reinisch B. International reference ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 42, № 4. P. 599-609, doi:10.1016/j.asr.2007.07.048.
3. E-region ionospheric storm on May 1-3, 2010: GSM TIP model representation and suggestions for IRI improvement / F. S. Bessarab, Yu. N. Korenkov, V. V. Klimenko, M. V. Klimentko, Y. Zhang // *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55, № 8. P. 2124-2130.
4. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation / M. V. Klimentko, V. V. Klimentko, A. T. Karpachev, K. G. Ratovsky, A. E. Stepanov // *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55, № 8. P. 2020-2032.
5. Глобальная эмпирическая модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере / Ю. К. Часовитин,

- А. В. Широчков, А. С. Беспрозванная, Т. Л. Гуляева, П. В. Денисенко, О. А. Арменская, С. Е. Иванова, А. И. Каширин, Н. М. Ключева, Е. А. Корякина, Л. С. Миронова, Т. Н. Сыкилинда, В. Б. Шушкова, В. И. Водолазкин, В. В. Соцкий, Н. Е. Шейдаков // Ионосферные исследования. 1988. № 44. С. 6-15.
6. Модель зимнего ночного главного ионосферного провала для различных уровней солнечной активности / А. Т. Карпачев, В. В. Клименко, М. В. Клименко, Л. В. Пустовалова // Proceedings of the 38th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" (Apatity, 2-6 March 2015.). Apatity, 2015.
7. Деминов М. Г., Карпачев А. Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. 2. Форма провала // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 4. С. 682-684.

#### *Сведения об авторах*

**Васильев Павел Анатольевич,**

аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, pvasiliev93@gmail.com

**Клопова Анастасия Игоревна,**

студентка, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, nasta\_313@mail.ru

**Артёменко Кристина Андреевна,**

студентка, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, temka2501@mail.ru

**Калугин Денис Вадимович,**

студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, kalugindns@gmail.com

**Клименко Максим Владимирович,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Западное отделение ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова, г. Калининград; доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, maksim.klimenko@mail.ru

**Карпачев Александр Трофимович,**

д.физ.-мат.н., руководитель лаборатории физики и моделирования ионосферы, ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова, г. Троицк, Московской обл., karp@izmiran.ru

**Клименко Владимир Викторович,**

к.физ.-мат.н., ведущий научный сотрудник, Западное отделение ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова, г. Калининград, vvk\_48@mail.ru

**Ратовский Константин Геннадьевич,**

к.физ.-мат.н., ведущий научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, ratovsky@iszf.irk.ru

**Коренькова Нина Алексеевна,**

младший научный сотрудник, Западное отделение ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова, г. Калининград, wdizmiran@gmail.com

**Белинская Анастасия Юрьевна,**

к.физ.-мат.н., ведущий научный сотрудник, Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, г. Новосибирск, anbell@ngs.ru

**Степанов Александр Егорович,**

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, a\_e\_stepanov@ikfia.ysn.ru

Научное издание

ТРУДЫ  
КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

ГЕЛИОГЕОФИЗИКА  
Выпуск 1

Редактор Е.Н. Еремеева  
Технический редактор В.Ю. Жиганов

Подписано к печати 09.11.2015  
Формат бумаги 60x84 1/8.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times/Cyrillic  
Усл. печ. л. 19.65. Заказ № 38. Тираж 400 экз.

---

*Российская Академия Наук*

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