

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**ОТЧЕТ
о научно-исследовательской
и научно-организационной деятельности
за 2021 год**



Мурманск, Апатиты
2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
СТРУКТУРА ПГИ.....	5
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.....	7
1.1. Важнейшие результаты завершенных фундаментальных исследований	7
1.2. Основные результаты исследований	15
ТЕМА: “Исследование солнечных и галактических космических лучей, и воздействия энергичных частиц на нижнюю ионосферу и атмосферу высоких широт совместно с другими геофизическими процессами” (FMES-2021-0011).....	15
ТЕМА: “Динамические процессы в системе «солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера» и их влияние на высокоширотную ионосферу” (FMES-2021-0008)	37
ТЕМА: Изучение особенностей распространения крайне низкочастотных волн искусственного и естественного происхождения в высоких широтах (включая Арктическую зону) (FMES-2021-0007)	45
ТЕМА: Пополнение баз данных и совершенствование обеспечения регулярных наземных геофизических наблюдений в Арктике. (FMES-2021-0007).....	58
ТЕМА: Исследование вариаций химического состава, электрических явлений, неоднородной пространственной структуры и динамических процессов в атмосферах Земли и других планетных тел (FMES-2021-0010).....	71
ТЕМА: Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли (FMES-2021-0012)	82
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	95
1. Общая информация	95
2. Взаимодействие с международными организациями и государственными органами иностранных государств в научной сфере	95
3. Деятельность института в международных организациях.....	96
4. Взаимодействие с зарубежными научно-образовательными организациями/зарубежными странами в рамках проектной деятельности	96
НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.....	98
1. Общие сведения.....	98
2. Деятельность Ученого совета.....	98
3. Деятельность аспирантуры.....	99
4. Издательская деятельность.....	100
5. Изобретательская деятельность	101
6. Организация научных совещаний и конференций.....	102
7. Образовательная деятельность.....	104
8. Участие в популяризации естественнонаучных знаний.....	105
БИБЛИОГРАФИЯ РАБОТ ИНСТИТУТА	111
Зарубежные публикации.....	111
Публикации в российских рецензируемых журналах	112
Публикации в трудах международных конференций.....	116
Публикации в трудах российских конференций	117
Тезисы докладов на международных конференциях.....	120
Тезисы докладов на российских конференциях	122
Статьи, отправленные в печать	128
Монографии и сборники	129

ВВЕДЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт» (ПГИ), основанный в 1960 году для исследования физических процессов в области высоких широт (выше 67° с. ш.), находится в городах Мурманск и Апатиты Мурманской области (Кольский полуостров) РФ. Основные обсерватории ПГИ располагаются в населенных пунктах Апатиты, Ловозеро, Лопарская, Верхнетуломский, Туманный (Кольский полуостров) и Баренцбург (архипелаг Шпицберген), где проводятся регулярные наблюдения полярных сияний, космических лучей и геомагнитных пульсаций. Тематика научных исследований ПГИ соответствует основным направлениям фундаментальных исследований Программы фундаментальных научных исследований Российской академии наук. Научная и прикладная деятельность ПГИ включает в себя разработку и передачу пользователям технических инноваций для высокоширотных гео- и радиофизических наблюдений, мониторинг геомагнитных вариаций в широком частотном диапазоне, мониторинг космических лучей, мониторинг атмосферы Арктики и другие задачи в области физики высоких широт, что обусловлено местонахождением Института.

Основные направления исследований Института: исследование актуальных проблем физики и аэрономии полярных сияний, выполнение прецизионных оптических измерений в области высоких широт; исследование современных проблем радиофизики и акустики, в том числе фундаментальных основ радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных явлений; исследование современных проблем физики плазмы, включая физику астрофизической плазмы (солнечный ветер) и низкотемпературной (ионосферной) плазмы; исследование современных проблем ядерной физики, включая астрофизические и космологические аспекты (физика космических лучей); исследование космического пространства, планет, Солнца и солнечно-земных связей.

В 2021 году научно-исследовательские работы в ПГИ выполнялись в соответствии с государственным заданием, утвержденным Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, грантов РФФИ (один грант) и РНФ (один грант). Шесть тем научно-исследовательских работ выполнялись в рамках фундаментальных научных исследований. Пять из них – это основные темы НИР, запланированные на три года, и одна тема – проведение исследований на архипелаге Шпицберген («Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли»).

Многолетнее плодотворное взаимодействие нашего Института с научными организациями Финляндии, Швеции, Норвегии, Болгарии, Чешской Республики, Китая сформировало прочные международные связи.

Совместная работа с зарубежными научными организациями проводилась по основным научным направлениям института в области исследования космических лучей, изучения физических процессов в магнитосфере и высокоширотной ионосфере Земли, состава и динамики атмосферы высоких широт, изучения солнечно-земных связей.

Необходимо отметить, что в связи с пандемией, большая часть запланированной международной деятельности либо была перенесена на последующие годы, либо отменена.

Сотрудники Полярного геофизического института принимают активное участие в организации и проведении всероссийских и международных конференций. Так, с 15 по 19 марта 2021г. в ПГИ (г. Апатиты) проходил 44-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений». В семинаре с докладами приняли участие более ста человек. В их числе 40 участников из других городов, из них не менее половины – молодые ученые. Среди

участников были представители исследовательских институтов из Японии, Финляндии и Норвегии. В связи с пандемией, остальные научные конференции 2021 года, проводимые Институтом, были отменены.

В 2021 г. в ходе издательской деятельности ПГИ были выпущены 4 сборника геофизических данных, публикуемых с 1996 года (в Internet с 2009г.), сборники тезисов докладов и трудов 44-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», а также подготовлены материалы по результатам Апатитского семинара (23статьи) для печати в журнале «Известия РАН. Серия физическая».

На базе Института осуществляется образовательная деятельность по программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по учебным дисциплинам: «Физика атмосферы и гидросферы», «Механика жидкости, газа и плазмы» и «Радиофизика»; формы обучения – очная и заочная; для иногородних поступающих в г. Апатиты имеется общежитие.

Большинство научных работ сотрудников Института написано с использованием данных приборов, расположенных на обсерваториях ПГИ и ведущих мониторинг различных геофизических явлений. Подробно о перечне объектов научно-исследовательской инфраструктуры можно узнать на сайте <http://pgi.ru/kagin/>.

СТРУКТУРА ПГИ

Научные подразделения:

- Сектор космических лучей (зав. сектором – к.ф.-м.н. Ю.В. Балабин)
- Лаборатория магнитосферно-ионосферных взаимодействий (зав. лабораторией к.ф.-м.н. А.Г. Яхнин)
- Сектор теоретического моделирования (зав. сектором – д.ф.-м.н. О.В. Мингалев)
- Лаборатория геофизических наблюдений (зав. лабораторией к.ф.-м.н. Я.А. Сахаров)
- Сектор оптических методов (зав. сектором – к.ф.-м.н. Ю.В. Федоренко)
- Лаборатория радиопросвечивания (зав. лабораторией к.ф.-м.н. В.А. Любчич)
- Сектор радиофизических исследований нижней ионосферы (зав. сектором – к.т.н. А.Д. Гомонов)
- Лаборатория атмосферы Арктики (зав. лабораторией – к.ф.-м.н. А.С. Кириллов)
- Сектор вычислительного эксперимента (зав. сектором – д.ф.-м.н., профессор В.С. Мингалев)

Обсерватории и полигоны:

- Обсерватория ПГИ «Ловозеро»
- Обсерватория ПГИ «Лопарская»
- Радиофизический полигон ПГИ «Верхнетуломский»
- Радиофизический полигон ПГИ «Туманный»
- Полигон ПГИ «Апатиты»
- Обсерватория ПГИ «Баренцбург»

Административно-хозяйственные подразделения:

Отдел кадров и аспирантуры (начальник отдела кадров - Е.М. Матвейчева,
тел. (8152) 253942, e-mail: ok@pgi.ru)

Бухгалтерия (гл. бухгалтер – М.Г. Михайлова)

Канцелярия (зав. канцелярией – И.С. Кузьмина)

Производственно - хозяйственная служба ПГИ в гг. Мурманск, Апатиты

Руководство Института:

Директор - д.ф.-м.н. Б.В. Козелов

Заместитель директора по научной работе – к.ф.-м.н. К.Г. Орлов

Заместитель директора по общим вопросам – А.Н. Миличенко

Помощник директора по международному сотрудничеству – к.пед.н. Е.И. Скиотис

Помощник директора по общим вопросам и инновациям – Е.А. Миличенко

Официальный сайт ПГИ: <http://pgia.ru/>

Кольская Арктическая геофизическая инфраструктурная сеть Полярного геофизического института (КАГИС ПГИ): <http://pgi.ru/kagin/>

АДРЕСА

ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ, МУРМАНСК

183010 г. Мурманск, ул.Халтурина, 15

тел.: (8152) 253958
факс: (8152) 253559
эл.почта: **general@pgi.ru**

ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ, АПАТИТЫ
184209 г. Апатиты, Академгородок, 26а
тел.: (81555) 76530
факс: (81555) 74339
эл.почта: **admin@pgia.ru**

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

1.1. Важнейшие результаты завершенных фундаментальных исследований

1. Впервые по данным наземных ОНЧ наблюдений на нескольких станциях были оценены положение и размеры областей мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, рассеивающих электростатические волны аврорального хисса в конус прохождения к земной поверхности.

При сравнении поляризации горизонтального магнитного поля и распределений плотности потока энергии по азимутальным углам, наблюдаемых на наземных станциях (рис. 1 а, г), с результатами моделирования распространения аврорального хисса к земной поверхности (рис. 1 б, в, д, е) были локализованы области рассеяния. Выявлено, что в случае регистрации только в Баренцбурге (BAB) единственная область была расположена к юго-западу от точки наблюдений и имела размеры по широте и долготе много меньше расстояния между станциями (рис. 1 б, в).

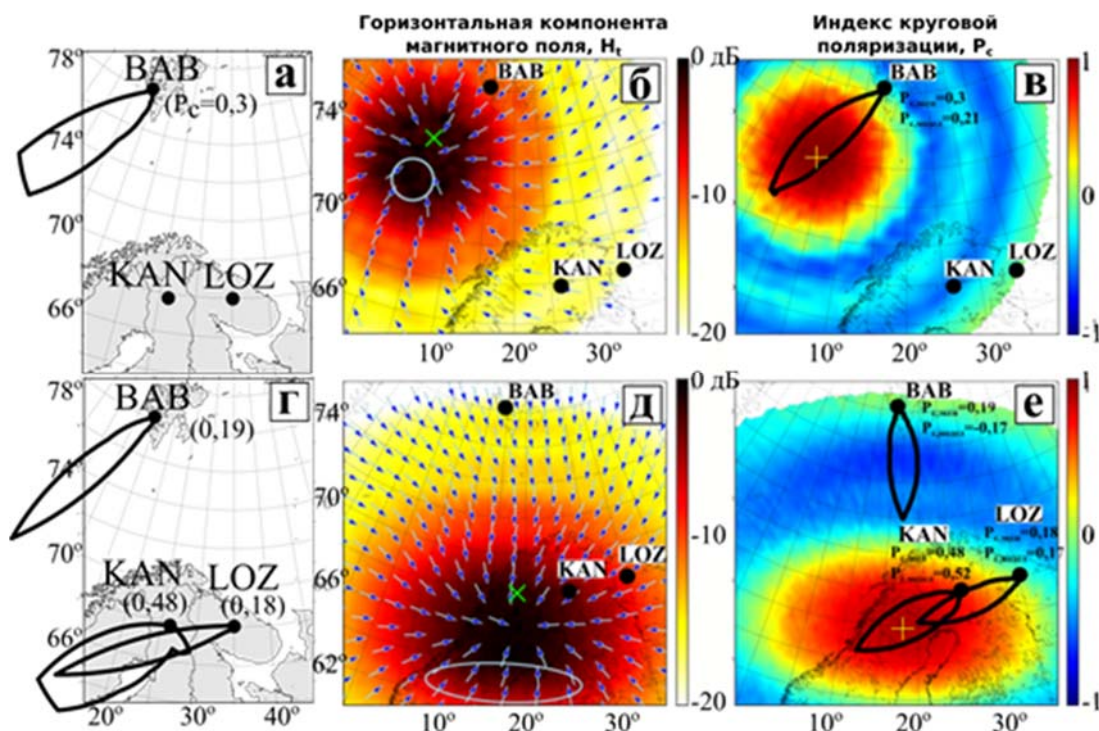


Рис. 1. а) распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода и вместе с индексами круговой поляризации, зарегистрированные 03 февраля 2019 года в интервале времени 19:04 - 19:05 UT; г) то же для интервала 19:34 - 19:35 UT; б, д) модельные распределения на земной поверхности горизонтальной компоненты магнитного поля для интервалов 1 и 2, соответственно; в, е) модельные распределения индекса круговой поляризации магнитного поля и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода для интервалов 1 и 2.

В случае регистрации излучений на трех станциях одновременно существовало две области рассеяния, разнесенных по широте. Положение и размеры одной области были схожи с наблюдаемыми в первом случае, о чем свидетельствует распределение потока энергии по углам (рис. 1 а, г). Вторая область располагалась к юго-западу от Каннуслехто (KAN) и Ловозеро (LOZ). Она имела размеры по долготе, сравнимые с расстоянием между этими двумя станциями, а по широте была ограничена (рис. 1 д, е).

Публикация:

А. С. Никитенко, О. М. Лебедь, Ю. В. Федоренко и др. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 3. — С. 398–403. 10.31857/s0367676521030200

Исполнители: Никитенко А.С., к.ф.-м.н. Лебедь О.М., к.ф.-м.н. Федоренко Ю.В. (Полярный геофизический институт). Работа выполнена совместно с сотрудниками Геофизической обсерватории Соданкюля (Финляндия), Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова.

2. На основе анализа экспериментальных данных по воздействию геоиндуктированных токов на силовые трансформаторы впервые получено аналитическое решение для гармоник тока через нелинейную индуктивность при подмагничивании ее постоянным током. Показано, что немонотонная зависимость амплитуды гармоник от величины постоянного тока определяется нелинейностью вебер-амперной характеристики катушки индуктивности.

Геоиндуктированные токи, возникающие в протяженных проводниках в периоды сильных геомагнитных бурь, представляют значительную опасность для высоковольтных сетей и способны вызывать повреждение электрооборудования, а также нарушение работы систем защиты и автоматики. В настоящее время в России функционирует единственная система регистрации геоиндуктированных токов в магистральных электрических сетях, созданная в 2011 г. на Северо-Западе России силами Кольского научного центра РАН и Полярного геофизического института.

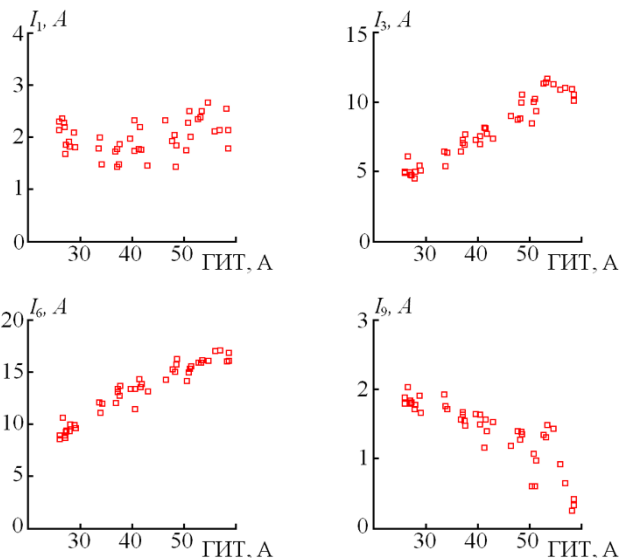


Рис. 2. Зависимости амплитуд токов гармоник в нейтрали автотрансформатора от величины ГИТ

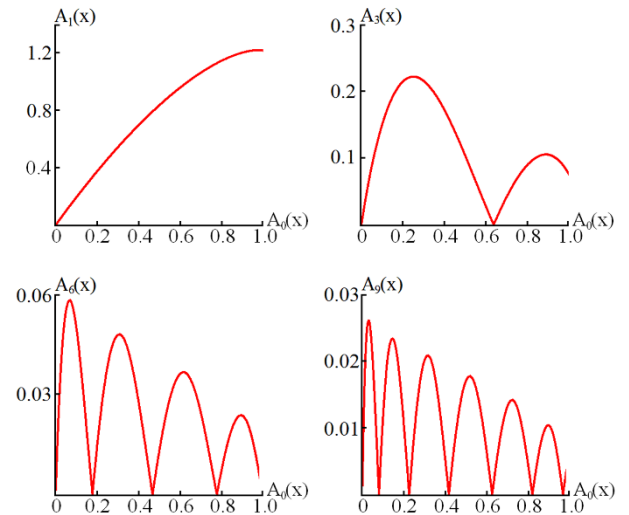


Рис. 3. Результаты расчета зависимости гармоник тока через нелинейную индуктивность от величины постоянной составляющей

По отношению к характерным временам процессов в электрической сети ГИТ можно считать постоянным током. Система мониторинга воздействия ГИТ позволяет проводить регистрацию квазипостоянных токов в нейтралях трансформаторов и содержания гармоник в

сети. В ходе экспериментальных исследований влияния токов в нейтрали на насыщение магнитопровода трансформатора выявлено неоднозначное поведение высших гармоник: возможны как рост, так и снижение амплитуды тока гармоник с ростом величины ГИТ (рис. 2). С помощью простейшей математической модели процесса подмагничивания нелинейной индуктивности постоянным током показано, что немонотонный ход функциональной зависимости гармоник тока от величины ГИТ в нейтрали силового автотрансформатора определяется исключительно нелинейной вебер-амперной характеристикой его магнитной системы (рис. 3). Результаты имеют качественный характер, но позволяют исследовать процесс насыщения магнитопроводов силовых трансформаторов при подмагничивании постоянным током и выяснить, какое возможное вторичное влияние способны оказать ГИТ на автоматику и релейную защиту силовых трансформаторов.

Публикация:

Селиванов В.Н., Сахаров Я.А. Влияние геоиндуктированных токов на содержание гармоник в силовых трансформаторах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 416-421. doi: 10.31857/S0367676521030248.

Исполнители: к.т.н. Селиванов В.Н. (ЦЭС КНЦ РАН), к.ф.-м.н. Сахаров Я.А. (ПГИ).

3. Впервые на основе изучения детальной модели кинетики электронно-возбуждённого молекулярного азота на высотах средней атмосферы Титана показано, что во время вторжения в атмосферу космических лучей (КЛ) неупругие молекулярные столкновения приводят к преимущественной аккумуляции поглощаемой энергии КЛ на нижнем колебательном уровне $v=0$ электронно-возбуждённого состояния молекулярного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$. Этот возбуждённый азот может активно участвовать в процессах образования многоатомных радикалов, обнаруженных в атмосфере Титана.

Молекулярный азот N_2 является главным молекулярным газом в атмосферах Титана (спутник Сатурна), Тритона (спутник Нептуна) и Плутона. Взаимодействие солнечных ультрафиолетовых фотонов, заряженных частиц из магнитосферы Сатурна, космических лучей с газами N_2 и CH_4 атмосферы Титана приводит к образованию атомов H, C, N и ряда первичных радикалов, таких как метил CH_3 , этинил C_2H , винил C_2H_3 и др., необходимых для синтеза сложных органических молекул.

Проведено исследование кинетики триплетных состояний N_2 на высотах верхней и средней атмосферы Титана во время высыпания в атмосферу высокоэнергичных электронов из магнитосферы Сатурна и космических лучей. Профили скоростей ионообразования в верхней, средней и нижней атмосфере Титана взяты согласно литературным данным (рис. 4).

Впервые при расчете концентраций метастабильного молекулярного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ учтены столкновительные молекулярные процессы с атмосферными составляющими N_2 , CH_4 , CO. Сравнение относительных концентраций $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-20)/N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0)$ для высот верхней и средней атмосферы показывает, что неупругие молекулярные столкновения приводят к аккумуляции энергии электронного возбуждения метастабильного азота преимущественно на нижнем колебательном уровне $v=0$ на высотах средней атмосферы (рис. 5). Взаимодействие возбужденного азота с другими составляющими атмосферы может сказаться на процессах образования химически активных радикалов, что, однако никогда ранее не учитывалось в химических моделях атмосферы Титана.

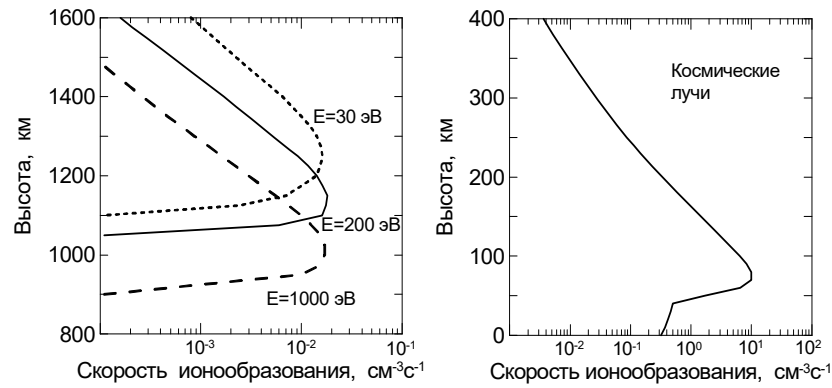


Рис. 4. Скорости ионообразования в атмосфере Титана: слева – в верхней атмосфере за счет магнитосферных электронов с энергиями $E=30, 200, 1000$ эВ; справа – в нижней и средней атмосфере за счет космических лучей.

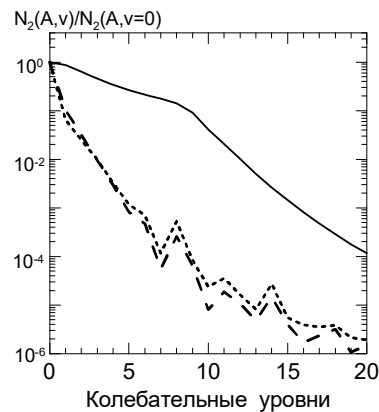


Рис. 5. Рассчитанные относительные концентрации метастабильного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-20)/N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0)$ на высотах 100 (короткие штрихи), 400 (длинные штрихи) и 1000 км (сплошная линия).

Публикация:

Кириллов А.С., Вернер Р., Гинева В. Моделирование колебательных населенностей метастабильного молекулярного азота в атмосфере Титана во время высыпания высокоэнергичных частиц. // Известия РАН. Серия физическая, 2022, т.86, №3, с.418-426.

Исполнители: д.ф.-м.н. Кириллов А.С. Работа выполнена совместно с сотрудниками из Болгарии.

4. Первые сопряженные наблюдения короткопериодических ОНЧ излучений на Земле и в магнитосфере.

Короткопериодические ОНЧ излучения с неизменным от импульса к импульсу дрейфом частоты впервые одновременно наблюдались в магнитосфере вблизи геомагнитного экватора и на наземных станциях. Впервые зарегистрирован переход от режима, соответствующего одному волновому пакету, осциллирующему вдоль силовой линии в магнитосфере, к режиму с двумя симметрично распространяющимся волновыми пакетами, и дана теоретическая интерпретация наблюдений, основанная на механизме пассивной синхронизации мод в магнитосферном циклотронном мазере.

Аннотация. Динамика электронов в радиационных поясах Земли в большой степени определяется их взаимодействием с очень низкочастотными (ОНЧ) электромагнитными

волнами (~ 103 — 104 Гц). Эти волны могут распространяться от одной ионосферы до другой вдоль магнитных силовых линий с характерным временем от 1 до 5 с в зависимости от широты и плотности плазмы. Нами исследован особый вид ОНЧ сигналов с периодической модуляцией амплитуды (периоды в несколько секунд), называемый короткопериодическими излучениями. В отличие от предыдущих исследований, в которых использовались наземные данные, мы впервые обнаружили и использовали одновременные наблюдения таких сигналов в магнитосфере (на спутнике Van Allen Probe вблизи геомагнитного экватора) и на наземных станциях (Каннуслехто и Ловозеро). Период следования импульсов (2 или 4 с) и их задержка на Земле относительно спутника согласуются с каналированным распространением свистовых волн между сопряженными областями ионосферы. В отличие от свистящих атмосфериков от молниевых разрядов, дисперсия групповой скорости не накапливается от одного импульса к другому, что указывает на нелинейный механизм ее компенсации. Наблюдались два режима. В одном из них направление вектора Пойнтинга в магнитосфере меняет направление на встречное от импульса к импульсу, и период повторения (2 с) в два раза меньше, чем на Земле (4 с), что соответствует одному волновому пакету, осциллирующему вдоль силовой линии. Этот режим переключается на другой, в котором период повторения импульсов не изменяется в магнитосфере, но становится вдвое меньше на Земле. Во втором режиме не наблюдается смена направления вектора Пойнтинга. Такой режим соответствует двум волновым пакетам, симметрично распространяющимся в магнитосфере и одновременно встречающимся на экваторе.

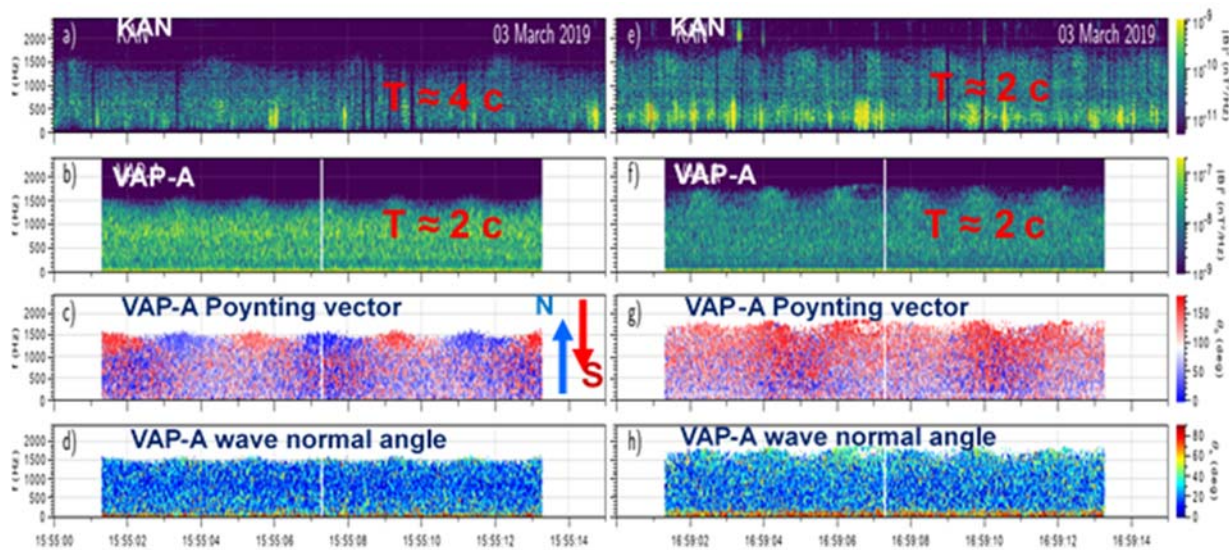


Рис. 6. Спектрограммы периодических эмиссий для двух 15-секундных интервалов, полученных на станции Каннуслехто (KAN) ((a и e) - спектральная плотность мощности (PSD) магнитной компоненты) и на спутнике Van Allen Probe A (VAP-A): (b и f) - магнитная PSD, (c и g) - полярный угол вектора Пойнтинга θ_S , и (d и h) - угол волновой нормали θ_k .

Публикация:

Demekhov A. G., Titova E. E., Manninen J., Nikitenko A. S., Pilgaev S. V. Short Periodic VLF Emissions Observed Simultaneously by Van Allen Probes and on the Ground // Geophysical Research Letters. — 2021. — V.48, No.20. — e2021GL095476. <https://doi.org/10.1029/2021GL095476>

Исполнители: д.ф.-м.н. Демехов А.Г., к.ф.-м.н. Титова Е.Е., Никитенко А.С., Пильгаев С.В. Работа выполнена совместно с сотрудниками из Финляндии.

5. Разработана новая методика расчета поля солнечного излучения в атмосфере Земли, позволяющая учитывать нарушение локального термодинамического равновесия в верхней атмосфере Земли в колебательных полосах молекул углекислого газа и озона. Новая методика применена при разработке усовершенствованного варианта негидростатической математической модели глобальной циркуляции атмосферы Земли.

Известно, что в атмосфере Земли на высотах, превышающих некоторый уровень, время жизни молекул CO_2 и O_3 в возбужденном состоянии становится меньше, чем время свободного пробега молекул между столкновениями. Это приводит к тому, что населенности колебательных состояний не описываются распределением Больцмана при температуре атмосферы, то есть нарушается колебательное локальное термодинамическое равновесие (ЛТР), и излучение атмосферного газа не описывается функцией Планка.

Авторами настоящей работы разработан и обоснован метод расчета функции источника излучения в колебательных полосах CO_2 и O_3 с учетом нарушения ЛТР в средней и верхней атмосфере Земли. Этот метод позволяет проводить расчеты поля излучения в атмосфере Земли с высоким разрешением по частоте (Line by Line) независимо для каждого узла сетки по частоте. Также этот метод позволяет строить параметризации оптических параметров атмосферы Земли, с помощью которых можно быстро и точно рассчитывать поля теплового и солнечного излучения в нижней, средней и верхней атмосфере Земли с учетом рассеяния (рис. 7). Разработанный метод был проверен в модельных расчетах и показал свою эффективность.

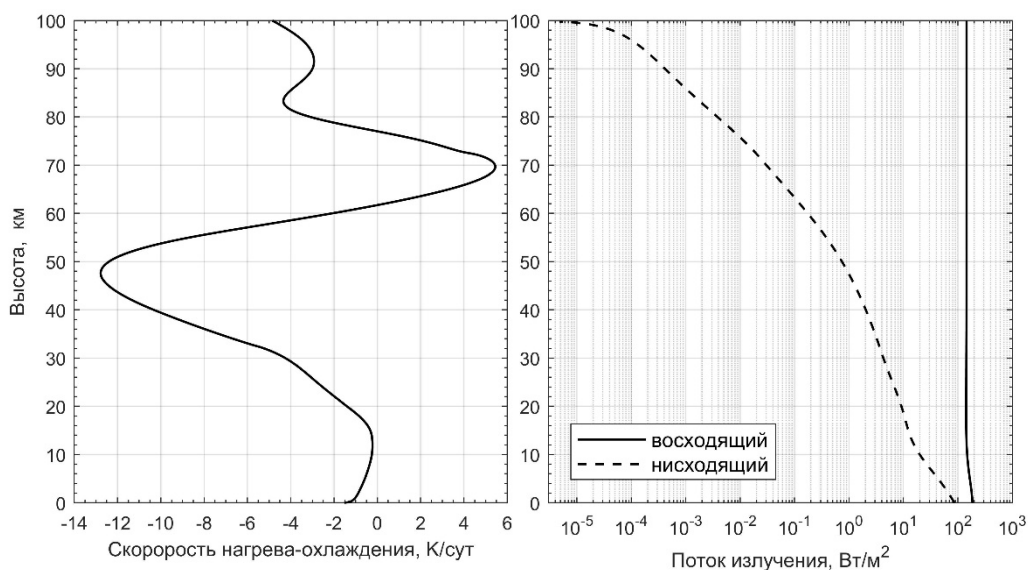


Рис. 7. Потоки восходящего и нисходящего собственного излучения в частотном диапазоне 500-1000 cm^{-1} (справа) и скорости нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет этих потоков (слева), полученные при эталонных расчетах.

Публикация:

Мингалев И.В., Орлов К.Г., Федотова Е.А. Учет нарушения локального термодинамического равновесия в верхней атмосфере Земли в колебательных полосах молекул углекислого газа в радиационном блоке модели общей циркуляции атмосферы Земли // Известия РАН. Серия физическая, 2021, том 85, № 3, с. 393–397. DOI: 10.31857/S0367676521030194

Исполнители: д.ф.-м.н. Мингалев И.В., Федотова Е.А., к.ф.-м.н. Орлов К. Г. (Полярный геофизический институт).

6. С помощью численной модели показано, что в возмущенных условиях тонкий токовый слой в ближнем хвосте магнитосферы Земли может быть образован за счет встречных потоков ионов кислорода ионосферного происхождения. Получены равновесные конфигурации подобного токового слоя, которые вполне согласуются с известными экспериментальными данными.

На предварительной фазе суббури в возмущенных условиях в околоземном плазменном слое наблюдается повышение относительной доли ионов кислорода от значений порядка 1-2 % до значений свыше 50%, а также неоднократно наблюдалось присутствие токонесящих ионов кислорода в токовом слое (ТС) ближнего хвоста и потоки ионов кислорода O^+ ионосферного происхождения, направленные от Земли в хвост вдоль силовых линий магнитного поля, которые попадают в область токового слоя ближнего хвоста. В работе [Artemyev A.V., V. Angelopoulos, A. Runov, X.-J. Zhang, // J. Geophys. Res., Vol. 125. Iss. 7. e2019. JA027612. 2020 doi: 10.1029/2019JA027612] по измерениям миссии THEMIS было показано, что продольная скорость этих потоков в основном лежит в пределах км/с.

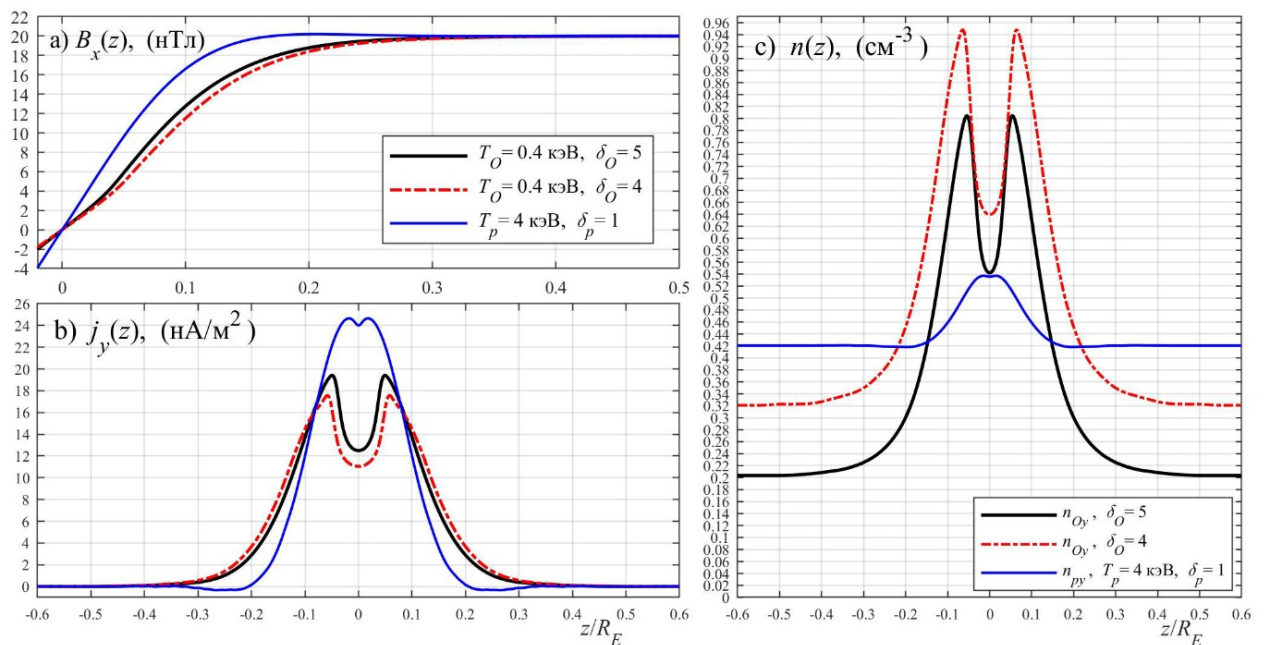


Рис. 8. На рис. показаны полученные с помощью численной модели две конфигурации токового слоя, образованные потоками ионов O^+ с температурой $T_O = 0.4$ кэВ. Конфигурация с продольной скоростью $V_{DO} = 4V_{TO} \approx 200$ км/с (с параметром потока $\delta_O = V_{DO}/V_{TO} = 4$) показана красными линиями, а конфигурация с $V_{DO} = 5V_{TO} \approx 250$ км/с (то есть $\delta_O = 5$) показана черными линиями. Для сравнения синей линией показана конфигурация, образованная потоками протонов с параметрами $T_p = 4$ кэВ, $V_{Dp} = V_{Tp} \approx 620$ км/с, то есть $\delta_p = V_{Dp}/V_{Tp} = 1$.

Из результатов моделирования (рис. 8) можно сделать вывод о возможности формирования ТС в ближнем хвосте магнитосферы в возмущенных условиях за счет потоков ионов кислорода ионосферного происхождения, когда магнитосферные протоны либо являются фоном, либо их потоки относительно слабы. По сравнению с ТС, образованными только потоками горячих магнитосферных протонов, конфигурации ТС, образованных потоками ионов кислорода, имеют ряд отличий, которые могут существенно влиять на их устойчивость.

Публикации:

Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Мерзлый А.М., Зеленый Л.М. Роль ионов кислорода в структуре токового слоя ближнего хвоста магнитосферы Земли // Физика плазмы. 2022. Т. 48, № 3.

Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Зеленый Л.М. Возможность образования токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы потоками ионов кислорода // Известия РАН. Серия физическая. 2022, том 86, № 3.

Исполнители: к.ф.-м.н. Мингалев О.В., Мельник М.Н., Сецко П.В., д.ф.-м.н. Мингалев И.В. (Полярный геофизический институт).

1.2. Основные результаты исследований

ТЕМА: “Исследование солнечных и галактических космических лучей, и воздействия энергичных частиц на нижнюю ионосферу и атмосферу высоких широт совместно с другими геофизическими процессами” (FMES-2021-0011)

Сроки выполнения темы: 2019-2021

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Ю.В. Балабин, к.т.н. А.Д. Гомонов

Отв. исполнители: к.ф.-м.н. Б.Б. Гвоздевский, вед. электроник Л.И. Щур, Е.Б. Васильев, О.Ф. Оглоблина, С.М. Черняков.

В рамках настоящей темы работали сектор космических лучей и сектор радиофизических исследований нижней ионосферы. В 2021 г. в ПГИ продолжался мониторинг космических лучей на двух станциях, расположенных в Апатитах и в Баренцбурге. Главной задачей станций космических лучей является обеспечение непрерывных и однотипных измерений. Используется набор детекторов, регистрирующий КЛ различных типов. Указанные станции являются высокоширотными и поставляют информацию о потоках радиации, поступающей в высокоширотную атмосферу.

Процессы, происходящие в нижней ионосфере, имеют существенное значение для понимания механизмов и явлений в системе тропосфера-стратосфера-мезосфера-термосфера, а также системе ионосфера-магнитосфера. В первую очередь они сказываются на условиях распространения радиоволн.

Земля подвержена значительному воздействию Солнца и межпланетной среды. Это воздействие проявляется в различных природных и технических процессах. Изучение этого влияния ведутся одновременно в двух направлениях: во-первых, наблюдение и сбор экспериментальных данных, во-вторых, численное моделирование процессов взаимодействия и сравнение выполненных наблюдений и рассчитанных эффектов. При этом постоянное повышение точности измерений и получение новых данных позволяют совершенствовать созданные модели и полнее учитывать различные эффекты.

В рамках выполнения настоящей темы в 2021 г. были получены следующие **основные результаты**:

1. В течение 2021 г. продолжались наблюдения и регистрация потоков космических лучей на двух станциях нейтронных мониторов в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген). Данные нейтронного монитора в Апатитах в реальном времени стабильно поступали в сеть Интернет. Минимум солнечной активности был отмечен в конце 2019 года, в то же время начался новый, 25-й цикл. (п.13 ФИГАН, институт-исполнитель ПГИ).

Станция космических лучей в Апатитах ведет регистрацию потоков космических лучей в различных диапазонах энергий. Стандартный НМ имеет энергетический порог ~50 МэВ, регистрирует нейтроны с энергиями выше порога. Регистрация нейтронов умеренных (до 1 МэВ) энергий проводится с помощью бессвинцового нейтронного монитора 4-НМ-64. Детектор тепловых нейтронов собран на основе счетчиков СНМ-18. Детектора объединены в один комплекс, регистрирующий нуклонную компоненту космических лучей. В Баренцбурге регистрация космических лучей выполняется стандартным НМ. В общий доступ в режиме реального времени предоставляются данные НМ в Апатитах. Кроме того, эти же данные передаются в мировую базу данных НМ. Данные Баренцбурга в графическом виде также

доступны пользователям, числовые данные могут быть предоставлены по специальному запросу.

Начало нового цикла определяется по изменению полярности глобального магнитного поля Солнца. Согласно данным ИЗМИРАНа, минимум 24-го цикла был пройден в середине 2019. Более двух лет длится новый, 25-й солнечный цикл, и можно уже отметить некоторые особенности нового цикла.

Интенсивность потоков космических лучей за 2003-2021 гг приведена на рис. 9. Этот период охватывает минимумы 2009 г и 2019 г. Превысивший минимум активности Солнца наблюдался в 2009 г. и был необычно глубокий, а космические лучи достигли максимального значения с начала наблюдения на нейтронных мониторах. Минимум солнечной активности в 2020 г. оказался таким же глубоким (см. рис. 10) и даже более протяженным: вторая половина 2019 г. характеризуется полным отсутствием пятен в течение нескольких месяцев. В 2009 г. наблюдалось подобное. Однако, уровень космических лучей в 2019-2020 г оказался заметно меньше, чем в 2009, как это видно на рис. 9. по Апатитам и многим другим станциям.

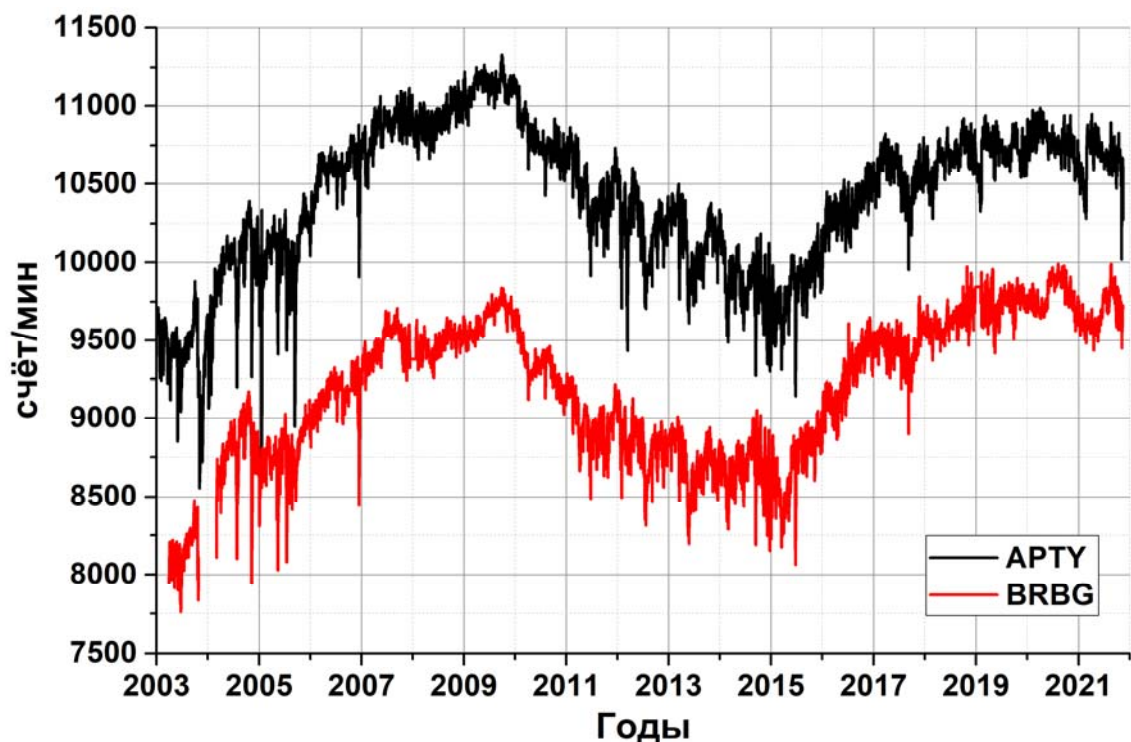


Рис. 9. Темп счета стандартных нейтронных мониторов в Апатитах и Баренцбурге в 2003-2021 г. Суточное усреднение. Отметим, что минимум солнечной активности соответствует максимуму потока космических лучей. Это связано с эффектом выноса солнечным ветром космических лучей к внешним границам гелиосферы. В минимуме солнечной активности скорость и плотность солнечного ветра падают, соответственно, возрастает поток космических лучей.

Известно, что минимумы, приходящиеся на переход с четного номера цикла на нечетный (например, с 24-го на 25-й) имеют растянутый и продолжительный максимум космических лучей, чем минимумы, соответствующие переходам с нечетного цикла на четный. Такое чередование острых и плоских максимумов в космических лучах можно видеть на рис. 10. Объясняется это тем, что полный цикл (т.е. возвращение к той же полярности магнитного поля на Солнце) происходит с периодом 22 года. Различие форм максимумов соответствует разной полярности глобального магнитного поля Солнца. Несимметрия возникает по той причине, что основной поток космических лучей составляют протоны (положительно заряженные частицы). По той же самой причине существует анизотропия космических лучей в магнитосфере Земли.

Аномально поведение, как можно заметить по рис. 9 и 10, на станции Баренцбург. Там наблюдается обратное: максимум космических лучей 2020 выше, чем в 2009. Эффект Баренцбурга отмечен на ряде станций, расположенных по всему земному шару от низких широт до полярных областей в обоих полушариях. Эффект Баренцбурга в общем наблюдается примерно на пятой части мировой сети НМ. Этот факт позволяет заключить, что причина не является аппаратурной или локальной. В 2021 продолжалось изучение эффекта Баренцбурга. Пока не удастся дать объяснения обнаруженному различию на ряде НМ. Сложные процессы, происходящие в гелиосфере на фазе минимума, возможно, служат причиной этого эффекта.

На рис. 9 видно, что явного падения счета на станциях не наблюдается. Следовательно, говорить о том, что поток космических лучей пошел на спад, пока рано. На протяжении трех лет 2019-2021 держится высокий уровень, на фоне которого наблюдаются кратковременные понижения уровня, связанные с форбуш-понижениями, вызванными корональными выбросами масс. Они происходили в начале 2019 и 2021 г.

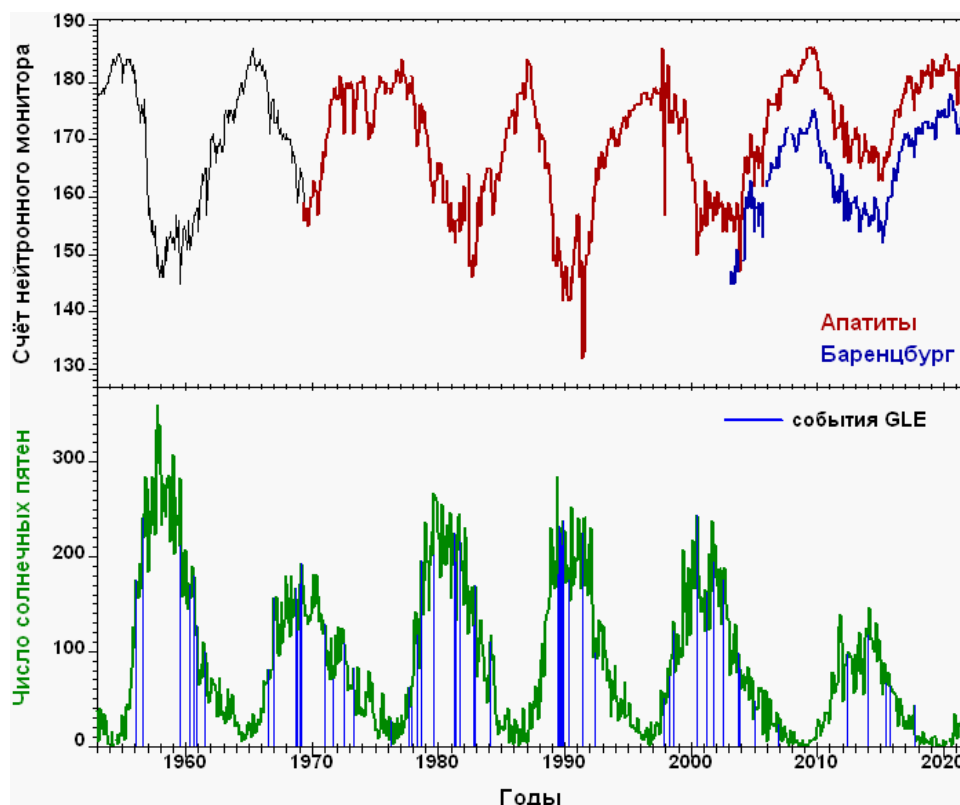


Рис. 10. Интенсивность космических лучей по данным НМ за 1955-2021 гг. (вверху) и показатель солнечной активности (число солнечных пятен) за тот же период (внизу). Вертикальные сини линии на нижней панели показывают моменты событий с солнечными космическими лучами (GLE). Отметим, что совсем недавно зарегистрировано такое событие GLE73 (28.10.21) – первое событие 25-го цикла.

Хотя прошедший 24-й солнечный цикл принято называть аномально низким по числу пятен, таковым он предстает только по сравнению с несколькими предыдущими (циклы 17-23) циклами. А 14-й и 16-й циклы ненамного отличаются от 24-го. Обратить стоит внимание и на то, что минимумы 12-го и 13-го циклов были очень глубокими и продолжительными. Т.е. говорить о чрезвычайно низкой активности Солнца в минимуме 2019 года нет оснований. Такие циклы с относительно небольшим числом пятен в максимуме и затянутыми на 2-3 года минимумами уже наблюдались.

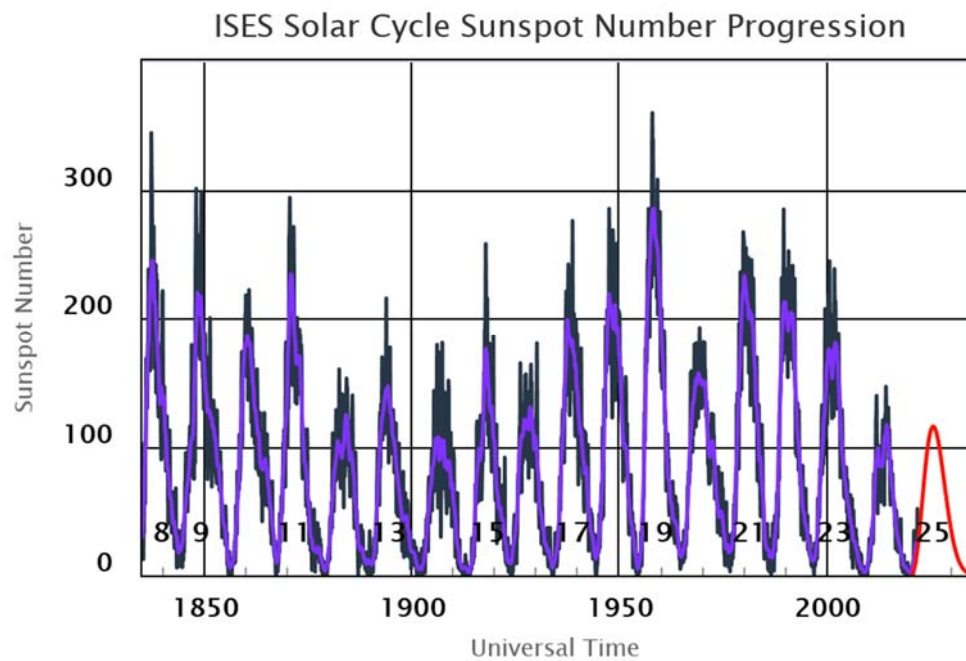


Рис. 11. Показатель солнечной активности (число солнечных пятен) за период 1830-2021 гг. Синяя линия – сглаженные среднемесячные данные. Красным показан прогноз активности на 25-й цикл.

Публикации:

Балабин Ю.В., Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г., Янковский И.В. О вариациях потока космических лучей в конце 24 цикла солнечной активности // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т.85. № 3. С. 321-325. DOI:10.31857/S0367676521030030.

Руководитель и отв.исп.	к.ф.-м.н.	Ю.В. Балабин.
исп. с.н.с.	к.ф.-м.н.	Б.Б. Гвоздевский.
исп. м.н.с.		А.В. Германенко.
исп. м.н.с.		Е.А. Маурчев.
исп. вед. электроник		Л.И. Щур.
исп. м.н.с.		Е.А. Михалко.

2. В 2021 г. зарегистрировано событие GLE. Оно произошло 28.10.21 и было отмечено на многих станциях мировой сети нейтронных мониторов. Его продолжительность составила 4 часа, максимальная амплитуда всего 6 %. Нейтронные мониторы в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген) отметили амплитуду в 2-4 %. Это первое событие GLE в 25-м цикле. (п.13 ФИГАН, институт-исполнитель ПГИ).

Событие GLE (ему присвоен номер 73; GLE73) произошло 28.10.21 от активной области A2887 типа Beta-Gamma с координатами S26E04, начало события в 16:20 UT. Вспышка имела класс X1.0, максимум рентгеновского излучения достигнут в 15:35 UT, тип вспышки II/VI. Событие GLE73 вызвало возрастание потока космических лучей на 2-6 % на станциях мировой сети НМ. Профили возрастных на ст.Апатиты и Баренцбург показаны на рис. 12, на рис. 13 представлены данные бессвинцовой секции НМ за интервал, соответствующий GLE73, а на рис. 14 приведены профили некоторых станций НМ мировой сети. Во время события была спокойная межпланетная обстановка, Кр-индекс все сутки 28 октября держался на значениях 0-1.

В настоящее время производится сбор данных от различных источников и подготовка данных к проведению моделирования и расчетов.

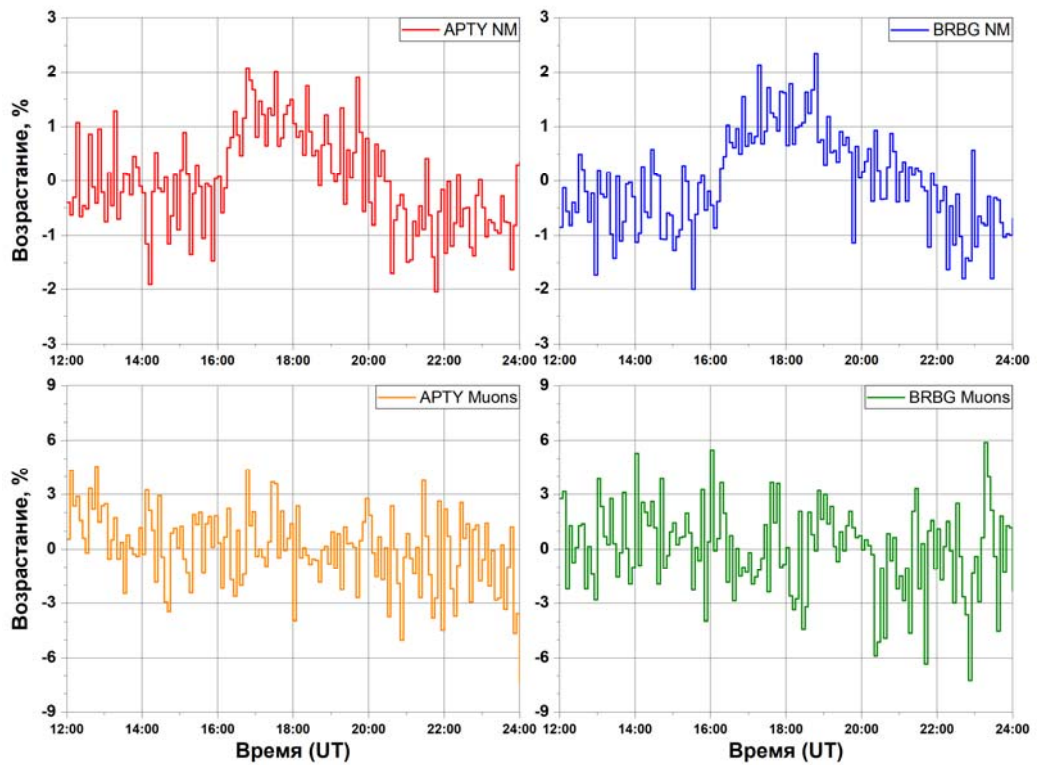


Рис. 12. Профили счета различных детекторов на станциях Апатиты и Баренцбург. Представлены 5-минутные значения. Верхние панели: нейтронные мониторы на этих станциях, нижние панели – мюонные телескопы.

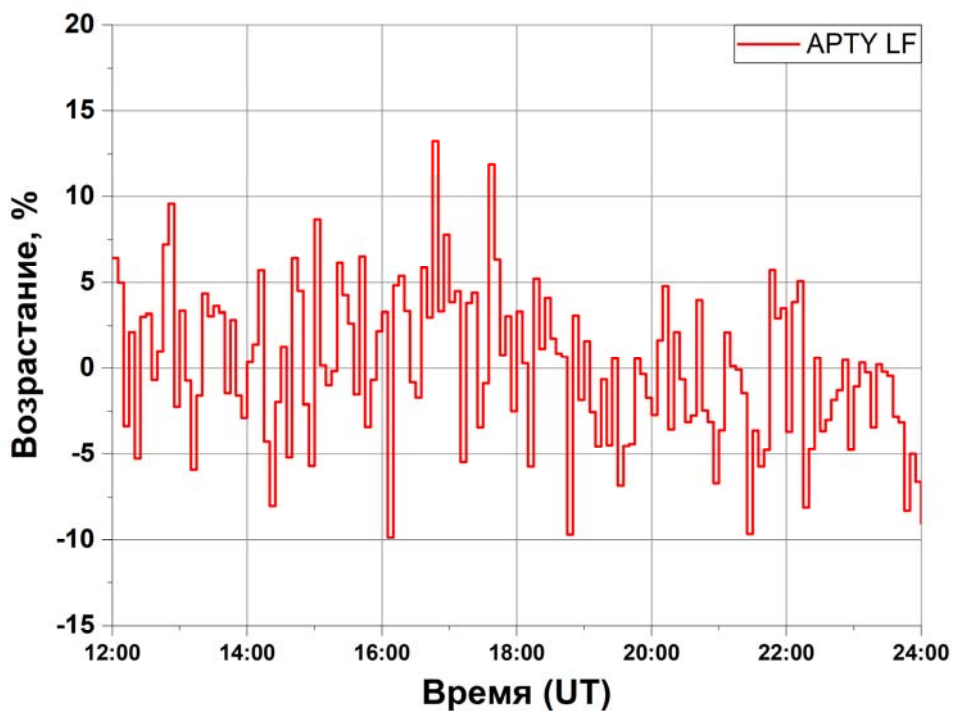


Рис. 13. Профиль счета бессвинцовой секции НМ за тот же интервал времени, что на рис.4. Представлены 5-минутные данные. Ввиду больших флуктуаций счета уверенно выделить возрастание, связанное с событием, не представляется возможным.

Как видим, нейтронные мониторы зарегистрировали, хоть и слабое, возрастание, в то время как на мюонных телескопах не наблюдается никакого эффекта от этого GLE. Для

нейтронных мониторов в Апатитах и Баренцбурге пороговым значением является атмосферное обрезание в 1 ГВ, тогда как для мюонных телескопов пороговое значение составляет около 5 ГВ. Отсутствие возрастания на мюонных телескопах говорит о том, что спектр солнечных космических лучей был мягким и не достигал значения 5 ГВ (~4 ГэВ).

Возрастание на бессвинцовой секции НМ (рис. 13), регистрирующей вторичные нейтроны с энергиями до 1 МэВ, выделить не представляется возможным ввиду больших флуктуаций счета. Они обусловлены тем, что темп счета у секции небольшой (400-500 имп/мин), флуктуации составляют ~5 %, и на их фоне уверенно определить возрастание в 2 % проблематично.

Возрастания на мировой сети НМ показаны на рис. 14. Наибольшая амплитуда ~6 % зарегистрирована на ст. Форт Смит в Северной Америке. Как было указано выше, в силу мягкости спектра солнечных космических лучей, возрастание наблюдалось только на станциях с жесткостью обрезания 1-2 ГВ, то есть на околополярных станциях.

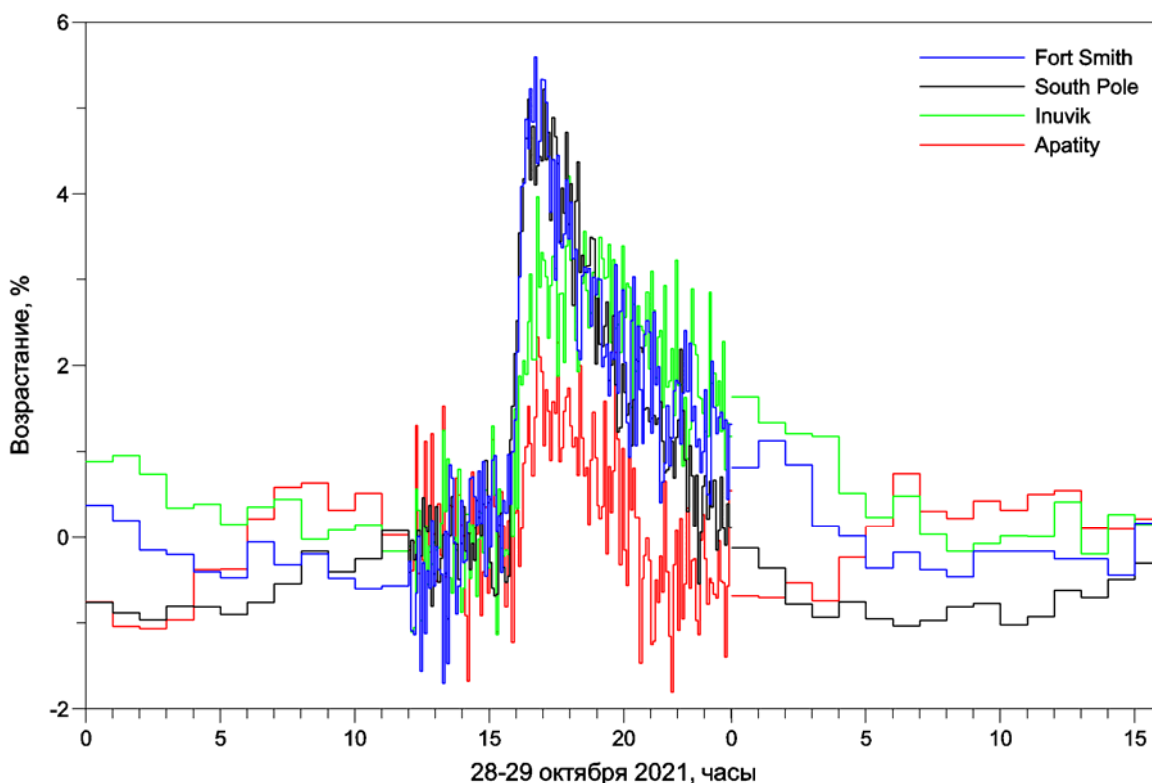


Рис. 14. Профили возрастаний на нейтронных мониторах мировой сети в событии GLE73 (28.10.21). Приведены профили станций Форт Смит, Южный полюс, Инувик и Апатиты. Представлены 5-минутные данные.

Руководитель и отв.исп. к.ф.-м.н.
 исп. к.ф.-м.н.
 исп. м.н.с.
 исп. м.н.с.
 исп. вед. электроник
 исп. м.н.с.

Ю.В. Балабин.
 Б.Б. Гвоздевский.
 А.В. Германенко.
 Е.А. Маурчев.
 Л.И. Щур.
 Е.А. Михалко.

3. Лаборатория космических лучей ПГИ продолжает долговременный эксперимент по наблюдению потоков нейтронов разных энергий и их вариаций, обусловленными локальными процессами в окружающей среде. Цель эксперимента - выявление взаимного воздействия космических лучей и метеорологических процессов в атмосфере.

В течение 2021 г. продолжался мониторинг потоков нейтронов умеренных (до 1 МэВ) и тепловых энергий. (п.13 ФИГАН, институт-исполнитель ПГИ).

Рис. 15 демонстрирует значительные сезонные вариации потока нейтронов тепловых и умеренных энергий (до 1 МэВ). На сезонные вариации накладывается 11-летняя модуляция, вызванная солнечной активностью. Она такая же, как и на стандартном НМ. Сезонная вариация обусловлена появлением и сходом снежного покрова. Поток нейтронов тепловых и умеренных энергий в приземном слое атмосферы формируется из потока вторичных нейтронов, образующихся в толще атмосферы и потока альбедных нейтронов из почвы. Вода как вещество с высоким содержанием протонов эффективно замедляет нейтроны. Соответственно, снежный покров уменьшает выход альбедных нейтронов из почвы, и суммарный поток нейтронов в приземном слое атмосферы уменьшается.

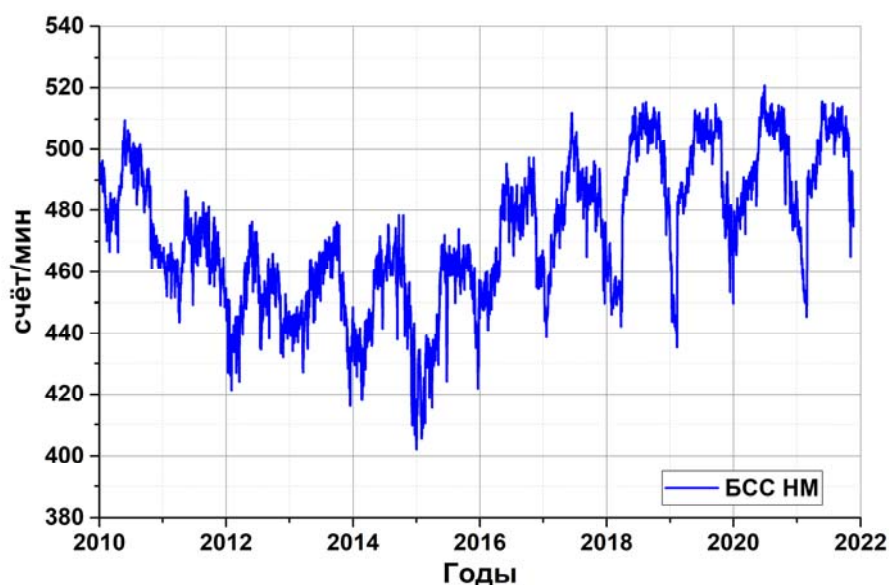


Рис. 15. Данные бессвинцовой секции НМ в Апатитах за 2010-2021 г. Использовано суточное усреднение.



Рис. 16. Профиль счета детектора тепловых нейтронов за 2020-21 г. Использовано суточное усреднение.

Стоит отметить, что по данным бессвинцовой секции следует тот же самый вывод: поток космических лучей в 2019-2021 остался примерно на одном уровне несмотря на то, что прошло уже более двух лет с момента прохождения минимума солнечной активности.

На рис. 16 приведены данные детектора тепловых нейтронов (ДТН), который установлен в лаборатории для мониторинга потоков только тепловых нейтронов. Сравнивая данные бессвинцовой секции и ДТН, можно увидеть, что сезонные вариации тепловых нейтронов примерно той же величины.

Руководитель и отв.исп. к.ф.-м.н.	Ю.В. Балабин.
исп. м.н.с.	А.В. Германенко.
исп. м.н.с.	Е.А. Михалко.
исп. м.н.с.	Е.А. Маурчев.
исп. вед. электроник	Л.И. Щур.

4. Также в 2021 г. продолжался мониторинг потоков вторичных космических лучей в других компонентах: гамма-излучения (0.02-8 МэВ), электронно-мюонной компоненты с энергиями (>5 МэВ). Лаборатория космических лучей ПГИ продолжает эксперимент по наблюдению вариаций гамма-излучения, обусловленными метеорологическими процессами в атмосфере. Цель эксперимента - выявление взаимного воздействия космических лучей и метеорологических процессов в атмосфере. (п.13 ФИГАН, институт-исполнитель ПГИ).

Генерация электромагнитной компоненты излучения (гамма-излучение) производится вторичными высокоэнергичными космическими лучами. При этом гамма-излучение сильно поглощается воздухом: длина пробега гамма-кванта любой энергии составляет ~300 м на уровне моря. Поэтому поступающее на детекторы гамма-излучение по большей части возникает непосредственно в нижней атмосфере в пределах 1 км над детектором. Поэтому эта компонента излучения чувствительна к состоянию атмосферы и происходящим в ней метеорологическим процессам. Для проведения полных и надежных наблюдений лаборатория Космических лучей размещает детекторы в различных пунктах. А в Апатитах и Баренцбурге, где находятся станции космических лучей и выполняются комплексные непрерывные измерения потоков вторичных космических лучей разной природы. Регистрируются возрастания гамма-фона, происходящих при осадках. За прошедший год в Апатитах и Баренцбурге зарегистрирован ряд возрастаний, некоторые из них весьма примечательны. Эти возрастания свидетельствуют о наличии отдельного механизма воздействия космических лучей на атмосферные процессы. Важной особенностью этих событий является отсутствие сколь-нибудь заметного увеличения потока заряженной компоненты вторичных космических лучей.

Есть признаки, что частота событий возрастания гамма-фона зависит от солнечной активности. Основания для такого предположения вполне весомые: все компоненты вторичных космических лучей, наблюдаемые на земле, возникают вследствие взаимодействия с атмосферой Земли первичных космических лучей, поток которых подвергается модуляции со стороны Солнца. Для получения убедительного вывода необходимо выполнить измерения хотя бы один полный солнечный цикл. Поэтому в настоящее время ведется сбор данных о вариациях и возрастаниях гамма-фона, а также расширяется сеть наблюдений.

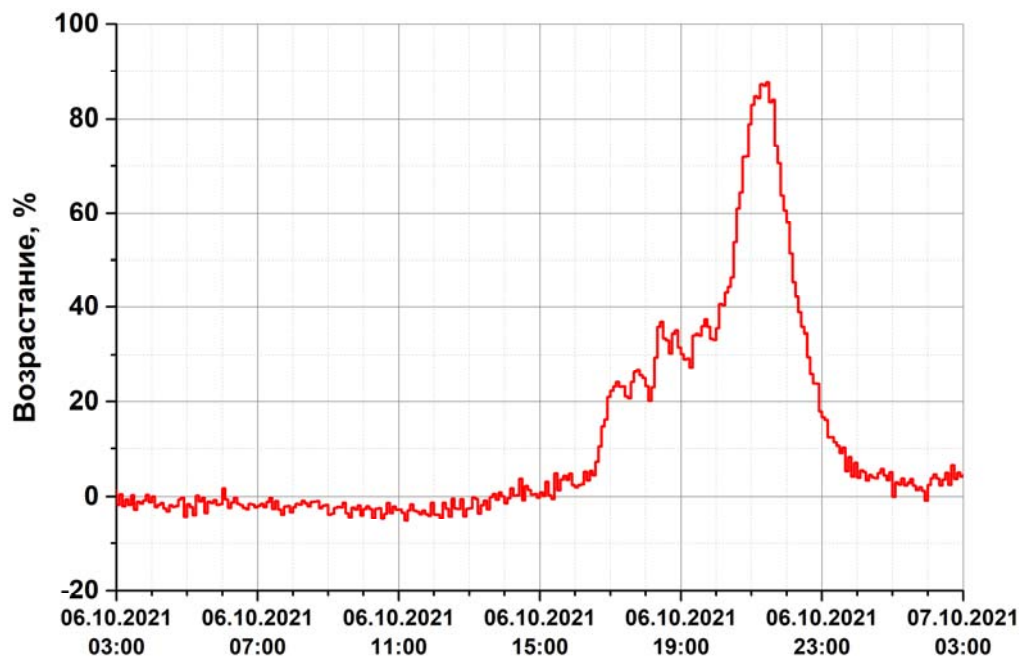


Рис. 17. Событие возрастания гамма-фона при осадках на ст. Апатиты в октябре 2021 г. Это одно из крупных событий 2021 г. Согласно данным осадкомера, в это время был сильный ливень. Используется пятиминутное усреднение, канал >100 кэВ.

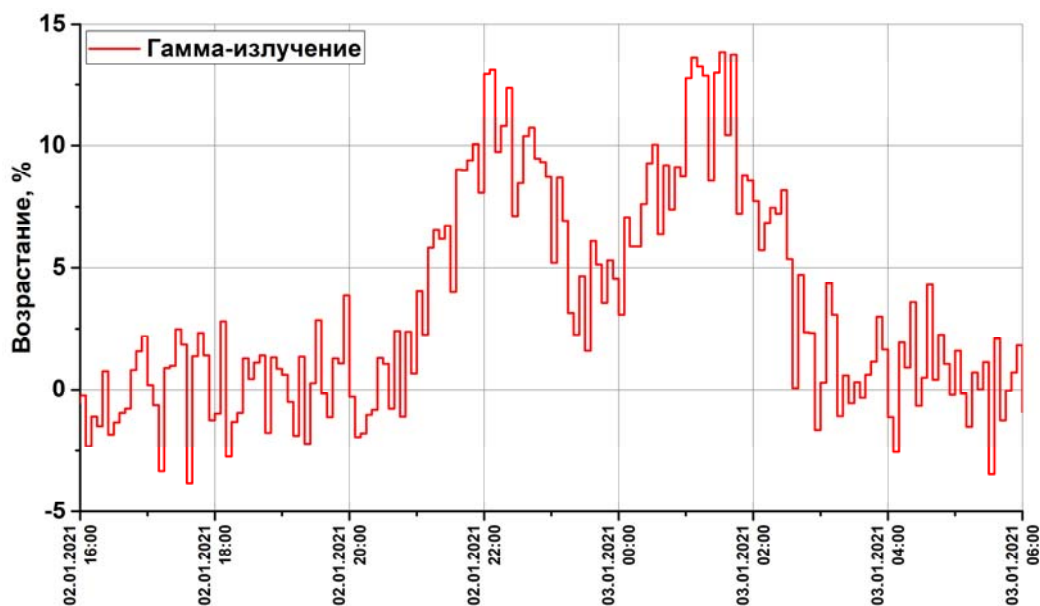


Рис. 18. Событие возрастания гамма-фона при осадках на ст. Баренцбург в январе 2021 г. Данное событие демонстрирует факт круглогодичного проявления эффекта возрастания при осадках. Используется пятиминутное усреднение, канал >100 кэВ.

Также многолетний мониторинг гамма-излучения в приземном слое атмосферы показывает, что поток гамма-излучения испытывает огромные сезонные вариации. В Апатитах амплитуда вариации составляет ~25 %, а в Баренцбурге ~50 % от уровня хорошей погоды летом. Понять причину, вызывающую эту вариацию, помогло наличие сети станций наблюдения за гамма-излучением. Данные шести станций, размещенные в разных геофизических и климатических условиях показывают, что основной причиной возникновения головной вариации является наличие снежного покрова. В Ростове-на-Дону, где установлен один из детекторов гамма-излучения, вариация отсутствует. О влиянии снежного

покрова на поток гамма-излучения указывает и зависимость амплитуды вариации от толщины снежного покрова.

На рис. 19. представлены данные детекторов заряженной компоненты за 2018-2021 г. На обеих станциях используются одинаковые детекторы, собранные на счетчиках Гейгера СТС-6. Вариации счета в Апатитах соответствуют сезонным вариациям потока мюонов. Так и должно быть, поскольку основную часть заряженных частиц у поверхности земли составляют мюоны. Иной вид вариаций в данных Баренцбурга пока сложно объяснить. Предположительно, причина в размещении детектора: в Баренцбурге он установлен вместе с секцией нейтронного монитора в стальном контейнере с толстыми стенками. В толстом слое железа идет процесс неупругого рассеяния гамма-квантов с выбиванием электронов, которые затем регистрируются счетчиками Гейгера.

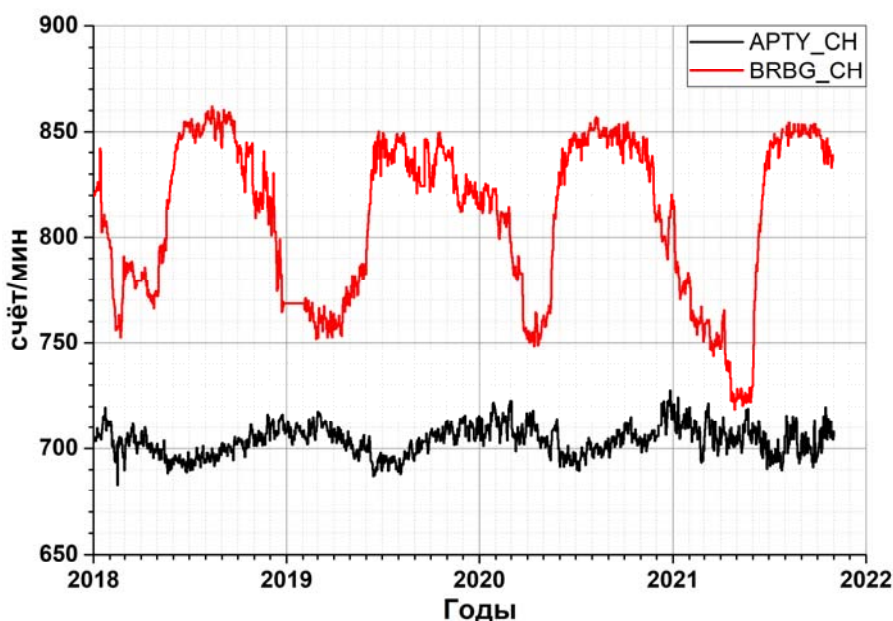


Рис. 19. Вариации потоков заряженных частиц в Апатитах и Баренцбурге. Суточное усреднение.

Публикации:

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Щур Л.И., Ларченко А.В. Наблюдение возрастания гамма-излучения при осадках во время морской экспедиции // Сборник: Климатические риски и космическая погода. Материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 30-35.

Руководитель и отв.исп.	к.ф.-м.н.	Ю.В. Балабин.
исп.	к.ф.-м.н.	Б.Б. Гвоздевский.
исп. м.н.с.		А.В. Германенко.
исп. м.н.с.		Е.А. Маурчев.
исп. вед. электроник		Л.И. Щур.
исп. м.н.с.		Е.А. Михалко.

5. Лабораторией Космических лучей собран и запущен в эксплуатацию мюонный телескоп в Баренцбурге для мониторинга вариаций потоков заряженных частиц: мюонной и электронно-позитронной компоненты вторичных космических лучей. Это

самый северный мюонный телескоп, ближайший размещается в Якутске. (п.13 ФИГАН, институт-исполнитель ПГИ).

На станции космических лучей в Баренцбурге установлен мюонный телескоп, аналогичный ранее установленному в Апатитах. Заряженная компонента до недавнего времени в Баренцбурге вовсе не фиксировалась, затем для ее регистрации применялся небольшой детектор на счетчиках Гейгера с маленькой эффективной площадью. Ценность тех данных была скорее качественной. И вот запущен в работу мюонный телескоп.

Мюонный телескоп собран по классической схеме: два слоя сцинтилляторов, разделенных слоем свинца. Однако, доставка материалов и комплектующих на Шпицберген представляет значительные трудности как в физическом, так и в юридическом плане. Поэтому решено было использовать по возможности уже имеющееся на станции. Сцинтилляционные пластины доставили, а в качестве свинцового слоя между пластинами решено было использовать нейтронный монитор. Свинцовая защита трубок нейтронного монитора имеет суммарно толщину 10 см – столько, сколько требуется для мюонного телескопа, а трубки СНМ-15 на поток мюонов оказывают незначительное воздействие. Пару сцинтилляционных пластин разместили под и над секцией нейтронного монитора. Для удобства и безопасности верхняя пластина была врезана в полиэтиленовую защиту нейтронного монитора. Это не скажется на нейтронном мониторе, поскольку пластиковый сцинтиллятор по процентному содержанию атомов водорода мало отличается от полиэтилена и способен выполнять роль замедлителя почти с той же эффективностью, что и полиэтилен. Процесс монтажа представлен на рис. 20.



Рис. 20. Установка сцинтилляционных пластин мюонного телескопа. Пластины обернуты в светонепроницаемую бумагу и фольгу. Для исключения возможности случайного протирания их при монтаже пластины были помещены в картонные коробки, которые при окончательной установке удалялись. Слева: размещение нижней пластины под нейтронным монитором. Справа: вид верхней пластины, врезанной в полиэтиленовую защиту нейтронного монитора.

Итак, мюонный телескоп простой конфигурации установлен на Шпицбергене на ст. Баренцбург. Поле зрения телескопа составляет ~ 0.8 стерадиан, он чувствителен к мюонам с энергией >300 МэВ. Верхний сцинтиллятор регистрирует потоки всех заряженных частиц: мюонов, электронов и позитронов. Рабочими каналами служат сигналы от верхнего сцинтиллятора (поток всех заряженных частиц), нижнего (поток легких заряженных частиц из почвы) и сигнал от схемы совпадений импульсов верхнего и нижнего сцинтилляторов, соответствующие пролету мюона через оба слоя сцинтилляторов и свинцовый слой.

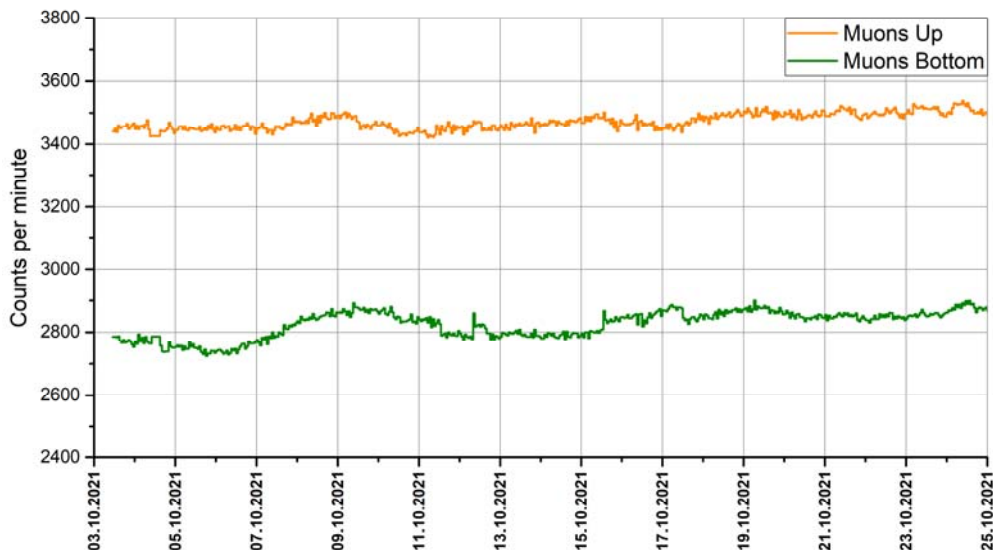


Рис. 21. Данные мюонного детектора в Баренцбурге. Представлены профили счета верхней и нижней пластин по отдельности. Часовые данные.

Сравнение профилей счета верхней и нижней пластин (рис. 21) показывает, что вариации у них не совпадают. Причина этому – место размещения. Все постройки в Баренцбурге делают на сваях: таковы требования строительства в условиях вечной мерзлоты. Секции нейтронного монитора также установлены на сваи. Это означает, что нижняя пластина не защищена снизу толстым слоем бетона на полу и в фундаменте, а приподнята над уровнем почвы на 1 м. При этом отделена она от окружающей среды лишь деревянной обшивкой и 2 мм стального пола в секции. Снег и пыль свободно перемещаются ветром под секцией. И счет нижней пластины отражает изменения радиоактивного фона почвы и снега.

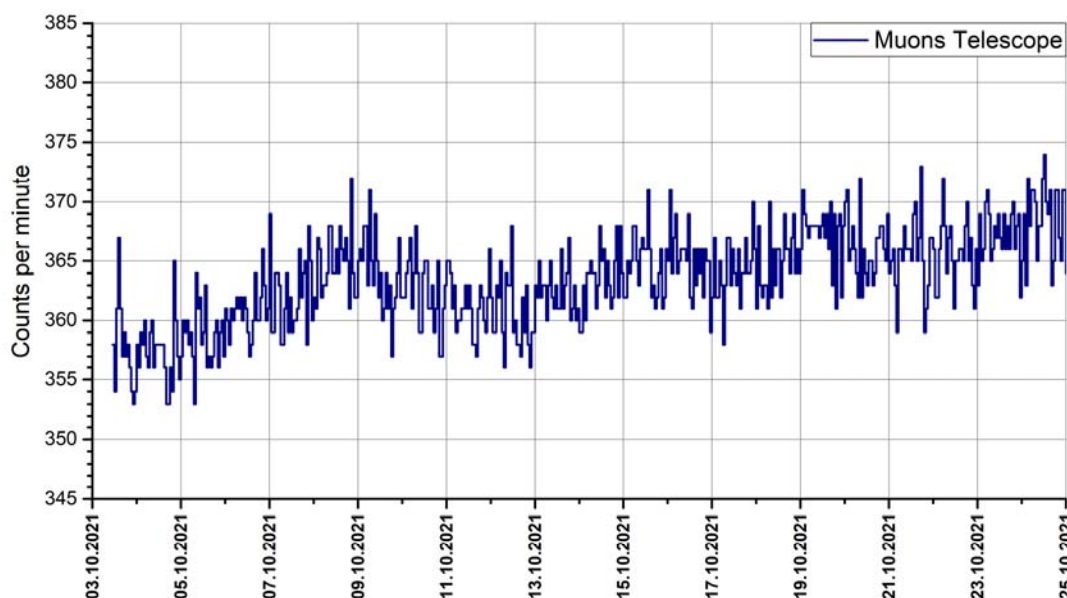


Рис. 22. Вариации счета мюонного телескопа в Баренцбурге. Часовые данные.

Пороговая энергия первичной частицы, порождающей в атмосфере Земли мюоны, способные достигнуть поверхности земли и преодолеть свинцовый слой, составляет ~ 5 ГэВ, а средняя энергия частиц, производящих такие мюоны, составляет ~ 50 ГэВ. Частицы таких энергий слабо отклоняются магнитосферой Земли, можно принять, что геометрическое поле зрения мюонного телескопа является и его конусом приема. Таким образом, расположенный

около полюса (широта места установки 78 градусов с.ш.) мюонный телескоп оказывается большую часть времени направленным в область около северного полюса эклиптики. Уже это весьма важно и является уникальной особенностью данного телескопа. Кроме того, Апатиты и Баренцбург находятся на близких меридианах, но на разных широтах. Вариации отношения счетов мюонных телескопов в Апатитах и Баренцбурге показывает анизотропию космических лучей в гелиосфере в меридиональной плане. На рис. 23 представлен предварительный результат вычисления такого отношения.

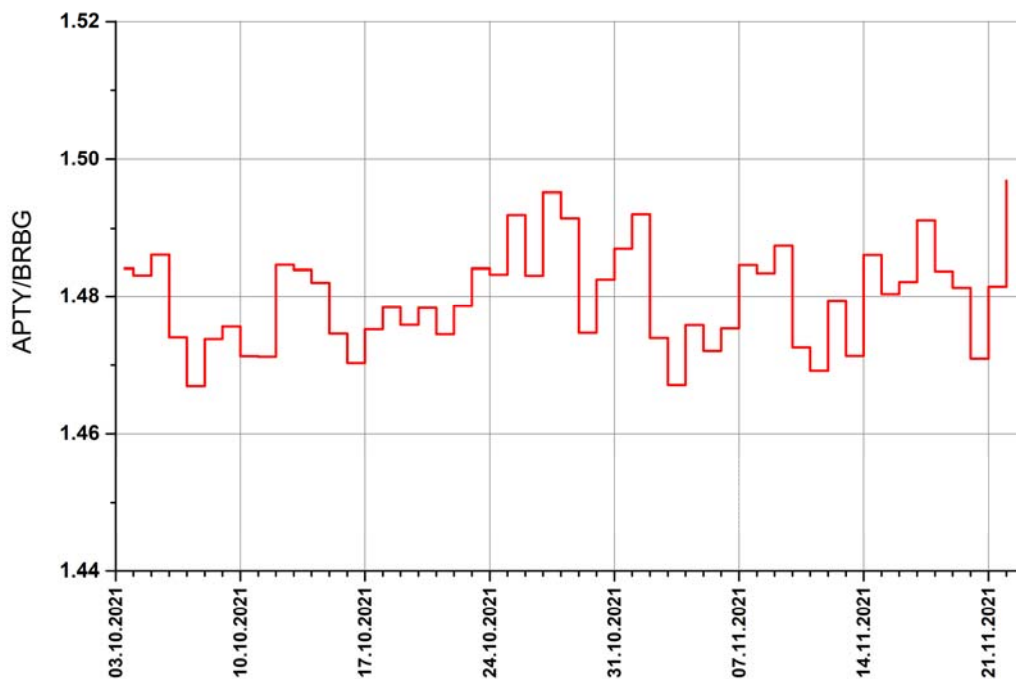


Рис. 23. Показатель анизотропии космических лучей по отношению темпов счета мюонных телескопов в Апатитах и Баренцбурге. Как можно заметить, вариации отношения превосходят флуктуации. Эти вариации указывают на изменения величины анизотропии космических лучей. Суточные данные.

Мюонный телескоп будет использоваться не только для мониторинга потоков космических лучей, но и для поиска связи вариаций заряженных частиц с возрастаниями гамма-фона при осадках. В отличие от кристаллических сцинтилляторов, пластиковый нечувствителен к гамма-квантам, поэтому данные, поступающие от пластин, содержат информацию о потоках только заряженных частиц.

Данные мюонных телескопов, как и других детекторов на ст. Апатиты и Баренцбург доступны по адресу <https://cosmicray.pgia.ru/>

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта № 18-77-10018.

Руководитель и отв.исп.	к.ф.-м.н.	Ю.В. Балабин.
исп.	к.ф.-м.н.	Б.Б. Гвоздевский.
исп. м.н.с.		А.В. Германенко.
исп. м.н.с.		Е.А. Маурчев.
исп. м.н.с.		Е.А. Михалко.

6. Разработанный в Полярном геофизическом институте программно-вычислительный комплекс для моделирования прохождения космических лучей через атмосферу Земли адаптирован для перевода полученных результатов в конкретные значения дозы излучения. Получены первые результаты, необходимые для

верификации методики при помощи известных ранее фоновых значений эквивалентной дозы. Для расчетов также использовалась вспомогательная модель объекта, построенная при помощи пакета для разработки программ GEANT4. (п.13 ФИГАН, институт-исполнитель ПГИ).

В результате проведенных расчетов по разработанной методике было получено значение эквивалентной дозы для площади $S = 2 \text{ м}^2$, представленное в табл. 1 как для отдельных типов частиц, так и для всего потока в целом. Следует заметить, что используемый в работе подход может быть также распространен и на реальные детекторы излучения, находящиеся на станции нейтронного монитора г. Апатиты. Для этого достаточно перевести скорость счета в единицы потока. Также необходимо знать функцию отклика каждого устройства и расчетные спектры вторичных частиц на уровне Земли. После верификации модельных результатов и экспериментальных данных, когда достоверно известно, что значения полученных интегральных потоков совпадают, можно переходить к расчету эквивалентной дозы при помощи модели калориметра. Если необходимо, эквивалентная доза при помощи табличных значений легко переводится в эффективную и коллективную эффективную дозы излучения. Высотные профили эквивалентной дозы для ГКЛ и СКЛ (GLE65) представлены на рис. 24.

Наряду с развитием прикладного аспекта программно-вычислительного комплекса продолжают экспериментальные разработки дозиметрического оборудования. Совершенствуются узлы уже разработанного компактного счетчика заряженной компоненты, разработанного и собранного также в Полярном геофизическом институте. Особенностью устройства является преимущественное использование отечественных компонентов, доступных на рынке электроники, а также собственная сборка узлов питания схемы, высоковольтного преобразователя и формирователя импульсов. Единственным зарубежным элементом остается микроконтроллер для системы сбора данных, но при доступности на рынке российского аналога может быть с легкостью подвержен замене. Такие счетчики заряженной компоненты космических лучей необходимы для большего покрытия области реальных измерений с целью последующей верификации модели для расчета прохождения частиц через атмосферу Земли.

Таблица 1

Расчетные значения эквивалентной дозы на уровне земли

Тип частицы	Поток интегральный через 0,1 м ² в секунду	Энергия, оставленная в объеме воздуха	Эквивалентная доза (мкЗв/час)
e ⁻	17.59994	1,38 МэВ/(кг·с)	0,0007959613176
e ⁺	16.87504	0,6 МэВ/(кг·с)	0,0003460701384
μ ⁻	1033.26390	1,41 МэВ/(кг·с)	0,0008132648256
μ ⁺	1186.53020	1,17 МэВ/(кг·с)	0,0006748367688
proton	67.55990	0,79 МэВ/(кг·с)	0,0022782951
γ	0.12328	0,09 МэВ/(кг·с)	0,000051910524
neutron (0,1 – 2 МэВ)	17.904	0,17 МэВ/(кг·с)	0,001961064144
Суммарная эквивалентная доза для S = 0.1 м ² :			0,0069214025
Суммарная эквивалентная доза для S = 2 м ² :			0,13842805

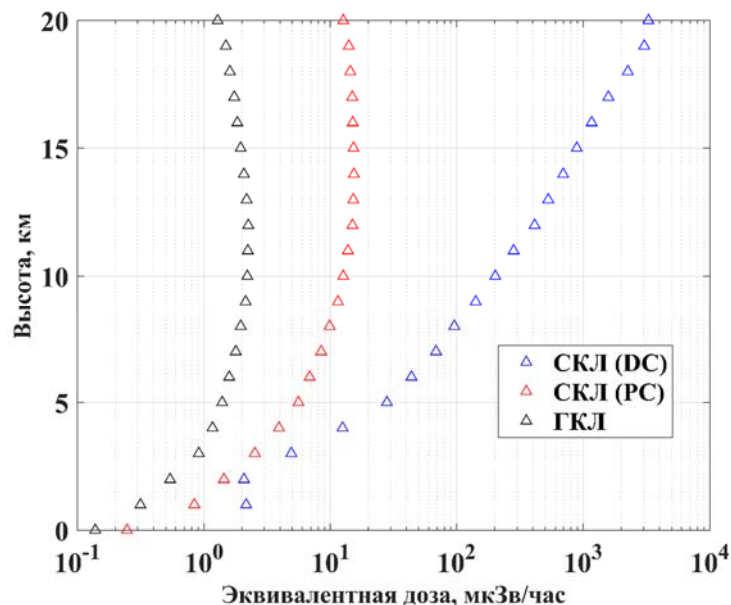


Рис. 24. Высотные профили удельной эквивалентной дозы излучения, оставленной в атмосфере Земли частицами вторичных КЛ, индуцированных протонами СКЛ и ГКЛ.

Публикации

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Перевод результатов моделирования прохождения протонов космических лучей через атмосферу земли в дозы излучения // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1634-1636.

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Компактные счетчики заряженной компоненты как дополнительное средство верификации моделирования прохождения космических лучей через атмосферу земли // В сборнике: Климатические риски и космическая погода. Материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 54-59.

Руководитель и отв.исп. к.ф.-м.н. Ю.В. Балабин.
исп. м.н.с. А.В. Германенко.
исп. м.н.с. Е.А. Маурчев.

7. Продолжена работа улучшения методики расчета скорости ионизации атмосферы Земли, индуцированной частицами солнечных космических лучей (протоны, альфа-частицы, ядра тяжелых элементов с $Z>2$). Рассмотрены профили ионизации, полученные для моделирования прохождения первичных протонов с энергетическими спектрами, соответствующими нескольким событиям GLE (номера 72, 69, 44 и 42). (п.13 ФИГАН, институт-исполнитель ПГИ).

Особенностью вычисления прохождения протонов солнечных космических лучей в работе является то, что для каждого интересующего участка атмосферы вычисляется не обычная вертикальная жесткость, как это происходит в случае для галактических космических лучей, а выводится спектр частиц с учетом конуса их приема. Для этого используется методика, разработанная в ПГИ и данные сети станций нейтронных мониторов. В качестве примера полученного результата можно представить глобальную сетку значений скорости ионизации атмосферы Земли для первичных протонов с энергетическим спектром, соответствующим событию GLE72 (<https://ruscosmics.ru/SCR.htm>) для высот от 1 км до 79 км с шагом в 1 км. На рис. 25 представлена типовая иллюстрация такой сетки для высоты 10 км.

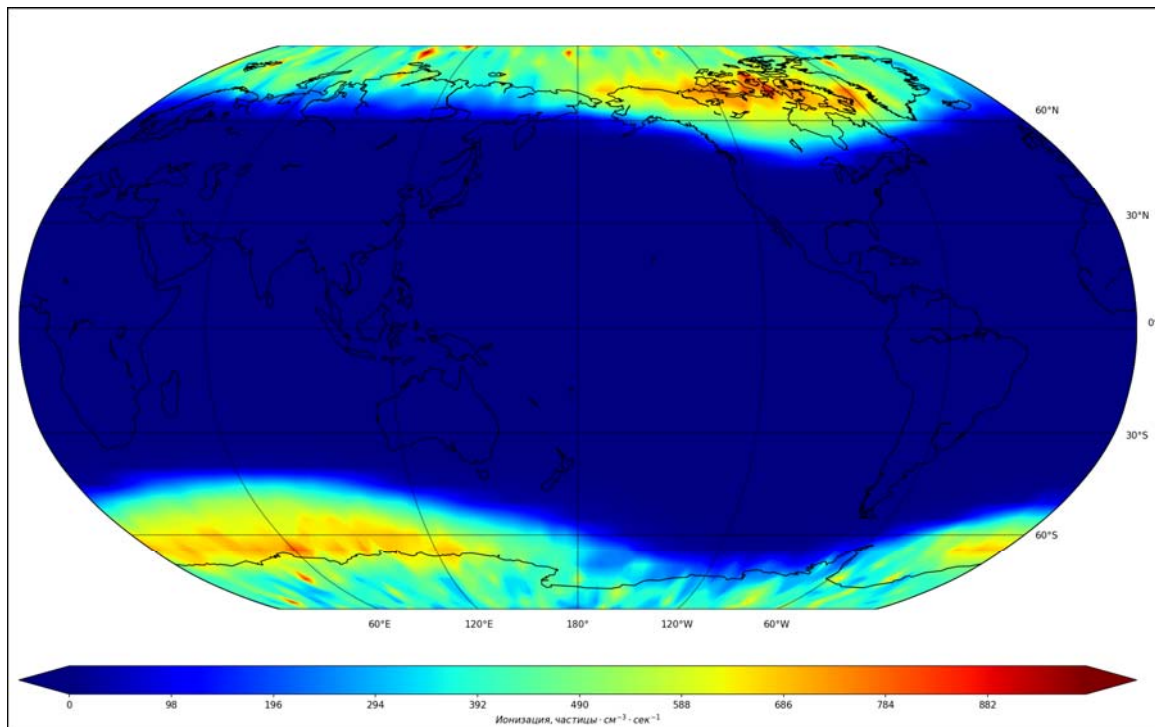


Рис. 25. Ионограмма, соответствующая высоте 10 км над уровнем моря. Результат получен при помощи глобальной модели и для источника первичных протонов, имеющих энергетический спектр первичных СКЛ, соответствующий времени события GLE №72.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18-77-10018.

Публикации

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б. Расчет скорости ионизации во время события GLE с использованием глобальной модели атмосферы земли и оценка вклада в этот процесс частиц галактических космических лучей с $Z > 2$ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021 Т. 85. № 3. С. 388-392.

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Расчет прохождения солнечных космических лучей через атмосферу земли для события GLE № 69 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 8. С. 1198-1200.

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Моделирование прохождения протонов солнечных космических лучей через атмосферу земли для событий GLE42 и GLE44 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 383-387.

8. Проведены измерения амплитуд частичных отражений обыкновенной и необыкновенной радиоволн от ионосферы на коротковолновом радиолокаторе радиофизического полигона «Туманный» Мурманской области и создан банк данных регистраций амплитуд радиоотражений и электронной концентрации за 2021 г.

В России постоянно действующая установка частичных отражений ПГИ по исследованию нижней ионосферы единственная и выполняемые работы являются уникальными. Выполняемые работы соответствуют мировому уровню.

Научный руководитель: к.т.н. А. Д. Гомонов

Ответственный исполнитель: н.с. О. Ф. Оглоблина

9. Построены суточные картины пространственно-временных распределений амплитуд отражений двух магнитоионных компонент сигнала и электронной концентрации за 2021 г.

Для решения поставленной задачи использовались экспериментальные данные, получаемые с помощью радара частичных отражений. Средневолновой радиолокатор вертикального излучения для исследования нижней ионосферы Полярного геофизического института (ПГИ) состоит из передатчика, приемника, приемно-передающей фазированной решетки и автоматизированной системы сбора данных. Он расположен на радиофизическом полигоне (РФП) «Туманный» (69.0 с.ш., 35.7 в.д.) в Мурманской области. Технические характеристики радиолокатора: рабочая частота – 2.60-2.72 МГц; мощность передатчика в импульсе – около 60 кВт; длительность импульса – 15 мкс; частота зондирования – 2 Гц. Антенная решетка состоит из 38 пар скрещенных диполей, занимает площадь 105 м² и имеет ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности около 20°. Поочередно принимаются две круговые поляризации, которые усиливаются приемником прямого усиления с полосой 40 кГц. Регистрация амплитуд сигналов проводится в интервале высот 50-240 км. Шаг снятия данных по высоте равен $0.5 \cdot n$, где $n = 1, 2, 3 \dots$.

В течение 2021г. были проведены ежесекундные регистрации амплитуд радиоотражений и по ним рассчитаны профили электронной концентрации (рис. 26). Работа проводилась в течение всего года. В результате сформирован банк данных амплитуд радиоотражений и электронной концентрации за 2021г. Построены суточные картины пространственно-временных распределений амплитуд отражений двух магнитоионных компонент сигнала и электронной концентрации в этот период. Полученные данные хранятся в электронном виде (на компакт-дисках и жестких дисках) в архиве института.

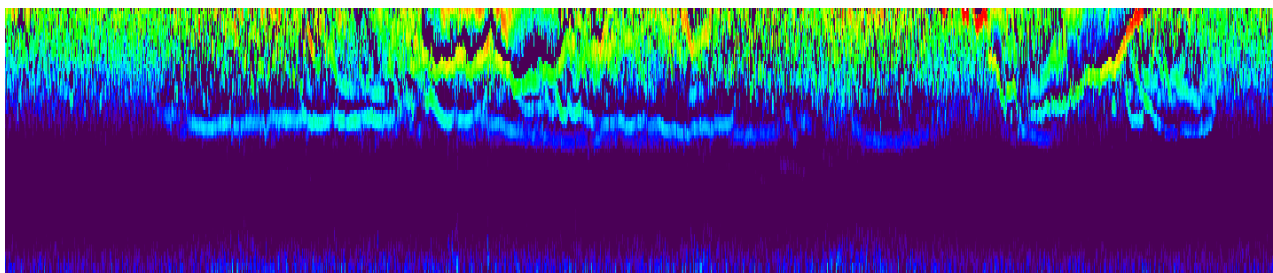


Рис. 26. Электронная концентрация 2 сентября 2021 г.

Научный руководитель: к.т.н. А. Д. Гомонов
 Ответственный исполнитель: н.с. О. Ф. Оглоблина

10. Определены вариации ионосферных параметров при наблюдении серебристых облаков над радаром частичных отражений.

Летом 2020 года в обсерватории Ловозеро проводились наблюдения за серебристыми облаками. Для их фотографирования использовалась узкоугольная камера, направленная в область, расположенную на высоте 80 км над радаром частичного отражения в обсерватории Туманный (69.0N, 35.7E). В основном погода была облачной, только 6 и 7 августа она была приемлемой для визуальных наблюдений. В это время вблизи северного горизонта Ловозеро наблюдались слабые серебристые облака как свечение. По данным радара частичных отражений появление серебристых облаков в поле зрения радара сопровождалось понижением высоты слоя электронной концентрации и колебаниями амплитуды отраженных волн с периодом около 20 минут.

На рис. 27 показано поведение электронной концентрации во время визуального наблюдения серебристых облаков из обсерватории Ловозеро. Начало и конец визуального наблюдения отмечены вертикальными красными штриховыми линиями. Появление серебристых облаков сопровождалось увеличением электронной концентрации, а затем уменьшением высоты слоя электронной концентрации. Скорость уменьшения высоты максимума слоя оценивается в 0.85 м/с. В конце визуального наблюдения серебристых облаков по данным частичных отражений наблюдалось увеличение высоты слоя электронной концентрации и возвращение его к начальной высоте. Подобное поведение электронной концентрации было описано нами ранее при наблюдении серебристых облаков 12 августа 2016 г. (Ролдугин В.К., Черняков С.М., Ролдугин А.В., Оглоблина О.Ф. Вариации полярных летних мезосферных отражений во время появления неоднородностей серебристых облаков // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58, № 3. С. 343-349).

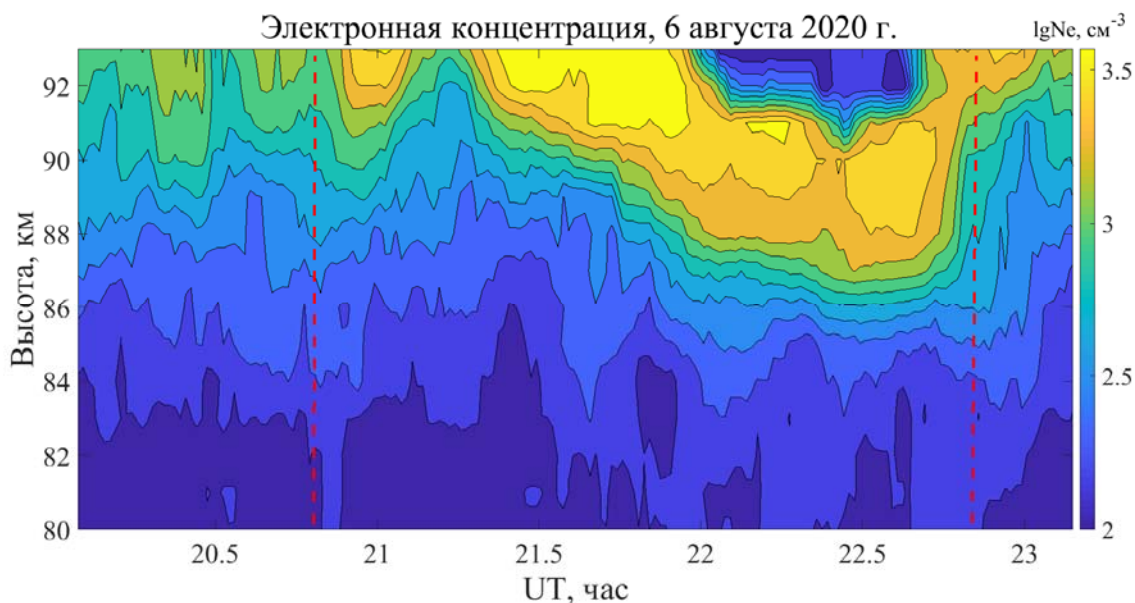


Рис. 27. Электронная концентрация 6 августа 2020 г.

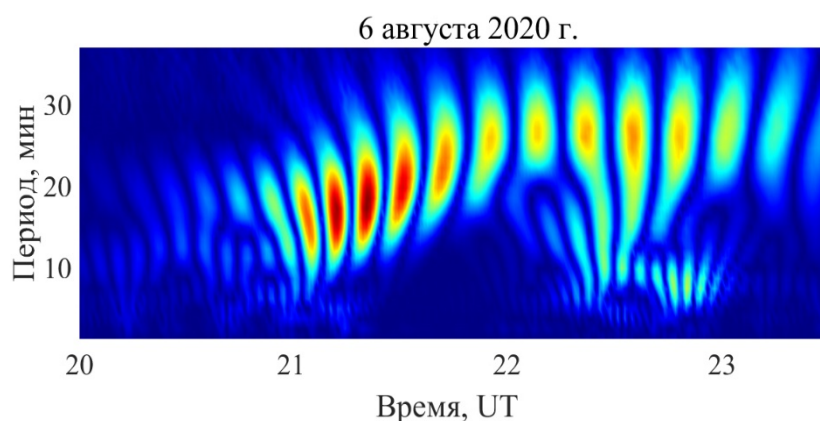


Рис. 28. Вейвлет спектр амплитуды обыкновенной волны 6 августа 2020 г.

Появление серебристых облаков сопровождалось усилением волновой активности в период их наблюдения. На рис. 28 приведен пример вейвлет спектра амплитуды обыкновенной волны на высоте 100 км. Явно видно появление интенсивных колебаний, соответствующее началу визуальных наблюдений серебристых облаков. Период колебаний увеличивался от 15 минут при появлении серебристых облаков до 25 минут к концу

наблюдений. При этом интенсивность колебаний уменьшилась, а затем колебания прекратились совсем.

В настоящее время идет обработка и анализ полученных данных.

11. Проведено сравнение модельных данных IRI-2016 с экспериментальными измерениями электронных концентраций в D-области ионосферы по сезонам 2017 года.

Для сравнения результатов измерений с модельными данными была выбрана эмпирическая модель IRI-2016, основанная на систематизации, классификации экспериментальных данных и выведении зависимости N_e от всех факторов, влияющих на характер профиля $N_e(h)$.

Для сравнения данных измерений с модельными, были отобраны четыре месяца 2017 года (март, июнь, сентябрь и декабрь). Данные геомагнитной обстановки за эти месяцы отображены на графиках (рис. 29, рис. 30).

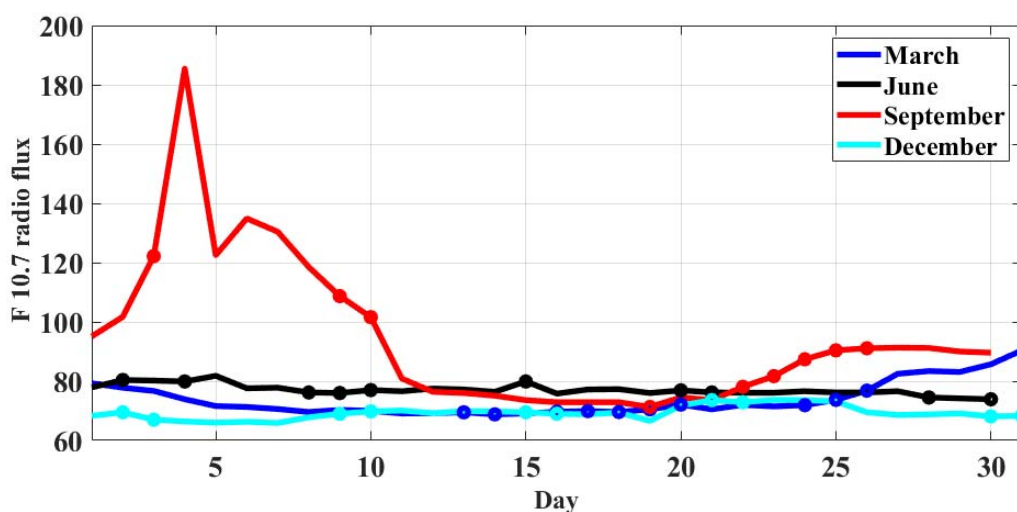


Рис. 29. Индекс F10.7 (поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7см). (ед. * 10^{-22} Вт/($m^2 \cdot Гц$)) за март, июнь, сентябрь и декабрь 2017г.

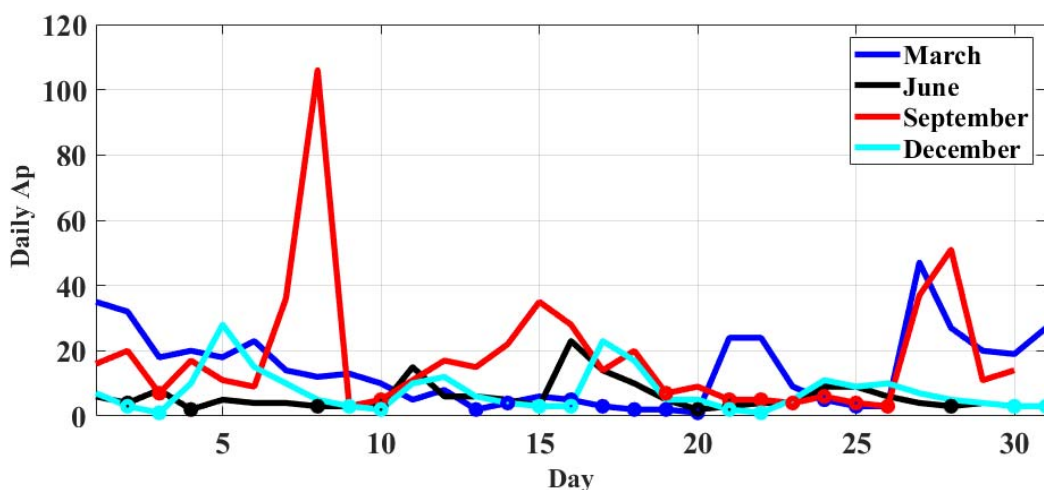


Рис. 30. Ap-индекс за март, июнь, сентябрь и декабрь 2017г.

Как видно из графиков, в начале сентября поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см (индекс F10,7) менялся значительно, в пределах 100-180 (в единицах 10^{22} Вт/($m^2 \cdot Гц$)). Для указанного периода Ap-индекс варьировался от 10 до 105, что соответствует неспокойной геомагнитной обстановки.

По выбранным месяцам проводилось сравнение данных измерений $Ne(h)$ с результатами моделирования. В модели IRI-2016 задавались координаты радара частичных отражений. Данные параметров солнечной активности находились в базе данных модели. Было проведено сравнение усредненных данных измерений с модельными усредненными данными (рис. 31).

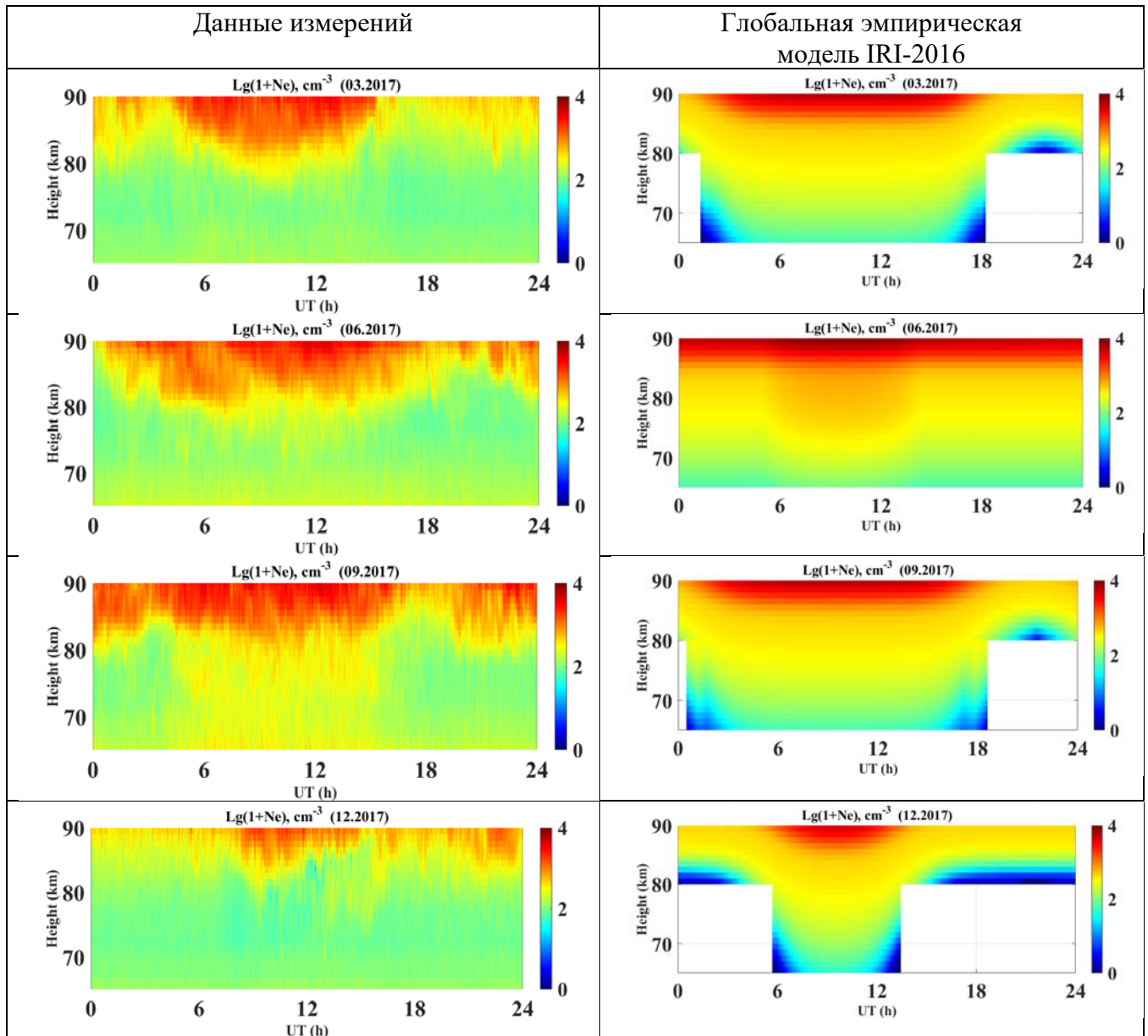


Рис. 31. Осредненные данные по электронным концентрациям за март, июнь, сентябрь и декабрь 2017г.

Ранее был проведен сравнительный анализ данных измерений электронных концентраций в дни со спокойной геомагнитной обстановкой в марте 2017г. Было выявлено при расчете относительных ошибок измерений электронных концентраций $Ne(h)$ с модельными данными, что везде без исключения наблюдаются зона с большими относительными ошибками (границы области с высокими градиентами электронных концентраций $Ne(h)$).

Кроме данного несоответствия, результат аналогичного сравнительного анализа по четырем сезонам (рис. 32) для (69.0 N, 35.7 E) показал, что модельные данные дают относительно приемлемые результаты в весенние и осенние сезоны, а в период полярной ночи

и дня (лето и зима) расхождение между модельными и наблюдаемыми значениями электронных концентраций (N_e) более значительны.

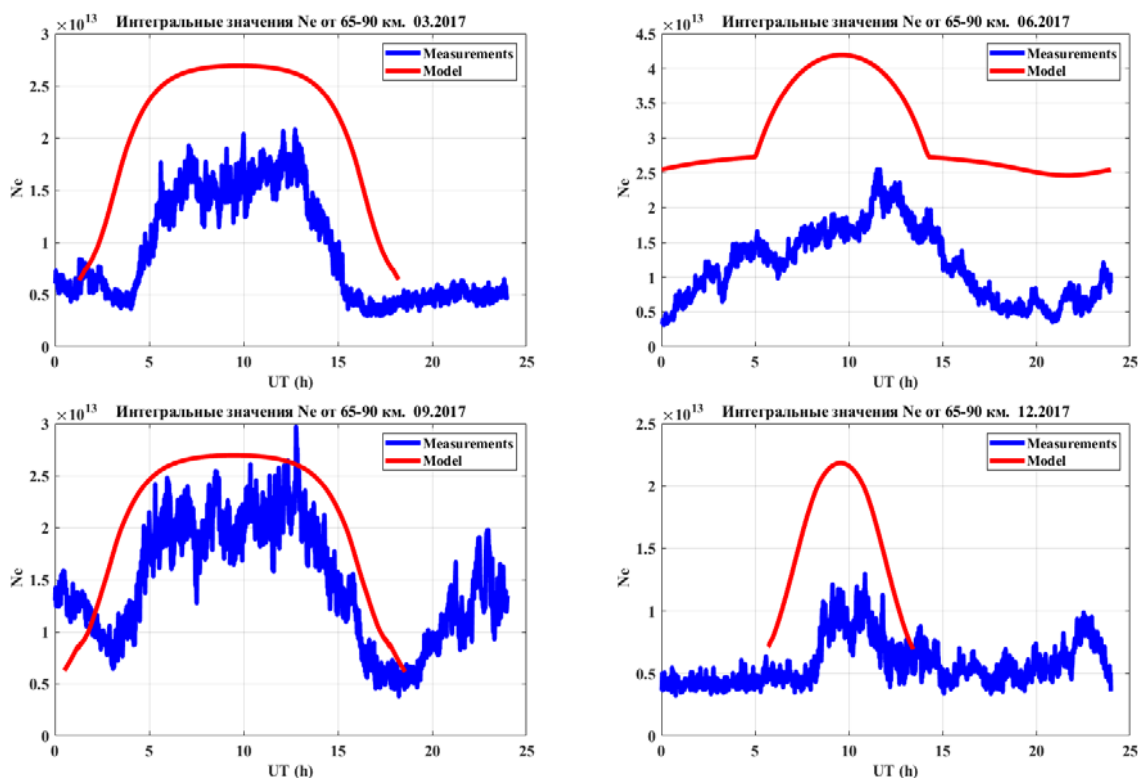


Рис. 32. Интегральные значения по электронным концентрациям (65-90 км.) за март, июнь, сентябрь и декабрь 2017г.

Научная новизна результатов и их значимость

Продолжается ряд непрерывных и однотипных наблюдений на НМ в фиксированных точках. Нейтронный монитор в Апатитах является одним из старых. Усилия лаборатории направлены на то, чтобы наблюдения не прерывались и были достоверными. С помощью непрерывных долговременных измерений на НМ надежно определяется прохождение максимума СА и другие вариации КЛ. Добавление новых приборов и обеспечение их бесперебойной работы также повышает ценность полученных данных. Сравнение данных бессвинцовой секции с данными стандартного НМ показывает, что потоки умеренных нейтронов (к которым чувствительна бессвинцовая секция), испытывают вариации, связанные как с активностью Солнца, так и с локальными сезонными процессами.

В настоящее время осуществляется мониторинг не только нуклонной компоненты (менее всего подвергающейся влиянию атмосферных явлений и потому выбранной основной), но и других компонентов ВКЛ: электромагнитной и электронно-мюонной. Подобный комплексный подход дает возможность исследовать и выявлять различные тонкие процессы взаимодействия КЛ и атмосферы Земли, и по результатам исследований улучшать используемые модели взаимодействия атмосферы и КЛ. Для моделирования создан программный пакет для расчета полной ионизации в атмосфере на всех высотах от 0 до 100 км. Ионизация может быть рассчитана как для спокойной межпланетной обстановки, так и во время солнечных вспышек, магнитных бурь и событий GLE. Спектры солнечных космических лучей в таких событиях определяются по специальной методике, ранее разработанной в ПГИ. В этом выражается новизна получаемых данных.

Все полученные результаты являются новыми, отвечающими современному уровню исследований в области исследования нижней ионосферы высоких широт. Они способствуют

дальнейшему прогрессу в изучении свойств нижней ионосферы в различных гелиогеофизических условиях. В России подобные работы в высоких широтах не проводятся. Результат соответствует мировому уровню.

Возможность практического применения

Впервые привлечено внимание к мягкой части гамма-излучения, возникающего в атмосфере от КЛ. Ранее проводились похожие наблюдения, однако, они были сосредоточены на выделение вариаций, связанных с радионуклидами естественного и техногенного происхождения. Факт, что фоновое излучения от КЛ тоже имеет значительные вариации (до 100 %) был установлен только в ходе многолетнего мониторинга именно в ПГИ на сети детекторов. Дополнительная ионизации, создаваемая этим излучением в атмосфере, не является незначительной и может оказаться важным дополнительным эффектом, требующим учета при моделировании и предсказании долговременных и кратковременных климатических изменений. Расчет ионизации в атмосфере позволяет оценивать влияние солнечных событий (вспышек, магнитных бурь, GLE) на атмосферу Земли и содержание ее малых компонентов (озон, окислы азота).

Результаты измерений используются при изучении структуры нижней ионосферы, уточнения теоретических моделей D-области и могут быть применены для оценки волновой активности в нижней ионосфере высоких широт и прогнозирования высокоширотного распространения радиоволн.

Заключение

Все запланированные работы выполнены в полном объеме. Результаты опубликованы или направлены в печать; они были доложены на российских конференциях. Исследования в рамках утвержденной темы продолжаются.

ТЕМА: “ Динамические процессы в системе «солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера» и их влияние на высокоширотную ионосферу” (FMES-2021-0008)

Научные руководители: д.ф.-м.н. В.Г. Воробьев, к.ф.-м.н. А.Г. Яхнин

Отв. исполнители: д.ф.-м.н. Б.В. Козелов, к.ф.-м.н. О.В. Мингалёв, к.ф.-м.н. Е.Е. Титова и др.

Согласно плану работ по теме НИР в 2021 г. проводились исследования высыпаний заряженных частиц в атмосфере, полярных сияний, в том числе по данным низкоорбитальных спутников DMSR изучалось давление ионов в областях ионосферных проекций различных магнитосферных доменов на дневной стороне в зависимости от V_z –компоненты межпланетного магнитного поля, динамического давления солнечного ветра, и местного магнитного времени; представлена методика восстановления высотных профилей объемной интенсивности свечения и оценки поперечных размеров лучистых структур в полярных сияниях по данным триангуляционных наблюдений на системе камер всего неба; представлены результаты анализа поляриметрии и многоцветной фотометрии полярных стратосферных облаков с использованием камер всего неба в Ловозере (Мурманская область, Россия, 68.0 N, 35.1 E). Исследована пространственно-временная динамика суббуревой активности, наблюдавшаяся во время сопряженных наблюдений спутника THEMIS D в плазменном слое магнитосферы и наземных наблюдений на Кольском полуострове; по данным наблюдения сияний в обсерватории Баренцбург (арх. Шпицберген), магнитометров сетей SuperMAG и IMAGE и спутников проекта AMPERE проведен сравнительный анализ развития двух полярных суббурь, наблюдавшихся над Шпицбергом 17 декабря 2012 г.; по данным спутников Van Allen Probes рассмотрена динамика релятивистских электронов внешнего радиационного пояса во время двух последовательных суперсуббурь (совпавших с главными фазами геомагнитной бури). По данным «цепочки» из трех магнитосферных спутников (Arase, Van Allen Probe A и B) в вечернем-ночном секторе магнитосферы, низкоорбитальных спутников POES и MetOp и наземным данным рассмотрены процессы генерации ЭМИЦ волн и высыпаний энергичных протонов; впервые представлены и проанализированы короткопериодические (с периодами 2 или 4 с) ОНЧ излучения с неизменным от импульса к импульсу дрейфом частоты в магнитосфере вблизи геомагнитного экватора и на наземных станциях; с использованием одновременных наблюдений свистовых волн на Земле и вблизи геомагнитного экватора и наблюдения электронных высыпаний с помощью низкоорбитальных наноспутников ELFIN CubeSat представлены экспериментальные свидетельства важности свистовых волн, распространяющихся в каналированном режиме, для эффективного высыпания релятивистских электронов в ионосферу; исследовано влияние реальной структуры волнового пакета электромагнитных ионно-циклотронных волн в радиационных поясах Земли на высыпания релятивистских электронов. Продолжено совершенствование методики численного интегрирования уравнений Максвелла в ионосферной плазме в задаче о распространении электромагнитных волн и широкополосных сигналов в диапазонах от УНЧ до КВ и УКВ; с помощью численной модели показано, что в возмущенных условиях возможно формирование тонкого токового слоя в ближней части хвоста магнитосферы Земли за счет встречных потоков ионов кислорода ионосферного происхождения. Получены равновесные конфигурации подобного токового слоя, которые вполне согласуются с известными экспериментальными данными; проводилась первичная обработка обсерваторских наблюдений ПГИ на камерах всего неба и обработка магнитометрических данных из обсерваторий Ловозеро, Лопарская, Баренцбург.

Всего в 2021 г. по теме было опубликовано 24 статьи в российских и международных рецензируемых журналах и 15 статей в трудах конференций. Основные результаты, полученные в ходе выполнения работ в 2021 году, изложены ниже.

1. Исследование высыпаний частиц в атмосферу Земли, спектральных и динамических характеристик полярных сияний.

По наблюдениям низкоорбитальных спутников DMSP F6 и F7 исследовано давление ионов в различных областях высыпаний дневного сектора. Показано, что наибольший уровень ионного давления наблюдается в области высыпаний полярного каспа. Средний уровень давления $\langle P_c \rangle = 1.0 \pm 0.3$ нПа, что почти на два порядка выше, чем в мантии. Средний уровень давления в высыпаниях LLBL $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$ нПа, а в области аврорального овала составляет в среднем ~ 0.5 от этого уровня.

По данным спутников DMSP обнаружено локальное увеличение ионного давления в полуденном секторе. В высокоширотной ионосфере возможно появления "пятна" свечения протонных и электронных полярных сияний, ожидаемые размеры которого могут составлять $\sim 2^\circ$ – 3° широты и 2–3 часа по долготе на исправленных геомагнитных широтах около 78° CGL.

Публикации:

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Давление ионов в различных областях авроральных высыпаний дневного сектора // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 6. С. 740–750. doi:10.31857/S0016794020060140. 2020.

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Давление ионов в области высыпаний дневного низкоширотного граничного слоя // Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т. 85. № 3. С. 336–340. doi:10.31857/S0367676521030315. 2021.

Интенсивный полярный стратосферный вихрь в Арктике, сместившийся в северную Европу зимой 2019–2020 годов, вызвал низкие температуры и частое появление полярных стратосферных облаков, за которыми последовало значительное уменьшение общего содержания озона. Поляриметрия и многоцветная фотометрия с использованием камер всего неба в Ловозере (Мурманская область, Россия, 68.0 N, 35.1 E) вместе с новым методом выделения облаков на сумеречном фоне позволили найти характеристики светорассеяния, связанные с распределением размеров частиц в полярных стратосферных облаках. Полученные результаты согласуются с результатами лидарных и баллонных экспериментов.

Публикации:

Ugolnikov O.S., Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Roldugin A.V. Retrieval of particle size distribution of polar stratospheric clouds based on Wide-Angle Color and Polarization Analysis // Planetary and Space Science, Volume 200, June 2021, 105213, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105213>

Представлена методика восстановления высотных профилей объемной интенсивности свечения и оценки поперечных размеров лучистых структур в полярных сияниях по данным триангуляционных наблюдений. Особенностью экспериментальных данных является использование камер, регистрирующих излучение в широком сине-зеленом спектральном интервале длин волн (380–580 нм) и небольшое расстояние между камерами (4.12 км). Восстановлены высотные профили объемной интенсивности излучения для примеров полярных сияний с ярко выраженной лучистой структурой. Обоснована возможность оценки энергетических спектров потоков высыпавшихся электронов, формирующих лучистые

структуры в полярных сияниях, по данным триангуляционных наблюдений аппаратурой, регистрирующей излучение в широком интервале длин волн (380–580 нм). Представлена методика расчета высотных профилей энерговыделения из высотных профилей объемной интенсивности излучения, регистрируемого приемной аппаратурой. Восстановлены энергетические спектры потоков высыпающихся электронов, ответственных за формирование лучистых структур в полярных сияниях. Показано, что энергетические спектры потока высыпающихся электронов можно аппроксимировать суммой двух электронных потоков, имеющих степенной энергетический спектр и максвелловское распределение по энергиям.

Публикации:

Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объемной интенсивности свечения // *Космические исследования*, 2021, том 59, No 4, с. 267–274.

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 2. Энергетические спектры высыпающихся электронов // *Космические исследования*, 2021, том 59, No 5, с. 355–360.

2. Изучение проявлений и физических механизмов магнитосферных суббурь.

Исследована пространственно-временная динамика суббуревой активности ($AL \sim 800$ нТл), наблюдавшаяся 24 декабря 2014 года в интервале $\sim 19:00 - 20:00$ UT, когда имели место одновременные наблюдения спутника THEMIS D (THD) в плазменном слое магнитосферы ($|X| \sim 6$ RE) и наземные наблюдения на Кольском полуострове. В это время были зарегистрированы три всплеска пульсаций Pi1B на станции Ловозеро. Показано, что первый всплеск в пульсациях связан с появлением структур типа «бусинок» в полярных сияниях на дуге во время предварительной фазы суббури, а второй и третий всплески наблюдались во время взрывной фазы суббури и соответствовали фронтам диполизации и инъекции энергичных электронов в магнитосфере, а также уярчению дуг около проекции THD и брейкапу в сияниях. Согласно наблюдениям наземных магнитометров, развитие суббури происходило около разрыва Харанга. По данным камеры всего неба в Апатитах показано, что движение предбрейкаповых авроральных форм сияний соответствовало предшествовавшей двухвихревой картине ионосферной конвекции, которая обычно наблюдается на предварительной фазе около разрыва Харанга, что согласуется с выводами предыдущих исследований.

Публикация:

Despirak I.V., Kozelova T.V., Kozelov B.V., Lubchich A.A. Observations of substorm activity from the data of MAIN camera system and THD satellite in the plasma sheet // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXIV Annual Seminar, Apatity, 2021, p. 16-19.

Рассмотрены две последовательные мощные геомагнитные бури, развивающиеся в сходных условиях в солнечном ветре, но отличающиеся наличием (в первой буре) и отсутствием (во второй буре) явления резкого ослабления потока релятивистских электронов (дропаута) во время главной фазы бури. Отсутствие дропаута во время сильной бури является событием уникальным. Анализ геомагнитных данных и наблюдений волн и частиц на спутниках Van Allen Probes позволил сделать вывод, что дропаут во время второй бури скомпенсирован ускорением энергичных электронов во время мощных геомагнитных

возмущений и повышенной волновой активности в ОНЧ и УНЧ диапазонах, сопровождающих эти бури.

Публикация:

А.Г. Яхнин, Т.А. Яхнина. Особенности динамики электронов внешнего радиационного пояса с энергией 1 МэВ во время геомагнитных бурь 7-8 сентября 2017 г. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022 (в печати).

3. Низкочастотные излучения в магнитосферно-ионосферной системе и процессы взаимодействия волн и частиц.

По данным «цепочки» из трех магнитосферных спутников (Arase и Van Allen Probes A, B) располагавшихся на $L \sim 5.5-6$ на $MLT \sim 19-22$ во время суббури 16-17 UT 1 декабря 2018 г. впервые показано, что генерация ЭМИЦ волн возможна непосредственно в области «суббурового клина», т.е. в области инжекции энергичных протонов и связанной с ней диполизацией магнитного поля. Вне области суббури генерация ЭМИЦ волн была связана (как это часто предполагается) с азимутальным дрейфом инжектированных энергичных протонов. Обнаружено отсутствие признаков ЭМИЦ волн (пульсаций Pc1) на земной поверхности в период генерации волн внутри суббуровой области, что может быть связано с невозможностью выхода волн к Земле через возмущенную ионосферу.

Публикация:

Yahnin A. G., Popova T. A., Demekhov A. G., Lubchich A. A., Matsuoka A., Asamura K., et al. Evening Side EMIC Waves and Related Proton Precipitation Induced by a Substorm // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2021. — V.126, No.7. e2020JA029091. <https://doi.org/10.1029/2020JA029091>

На основе измерений потоков энергичных протонов, холодной плазмы и магнитного поля на спутниках Arase и Van Allen Probes A, B для события 16-17 UT 1 декабря 2018 г. рассчитаны инкремент генерации волн, а на основе измерений волнового спектра – коэффициенты диффузии протонов в конус потерь. Максимум коэффициента диффузии хорошо согласуется с диапазоном энергий высыпающихся протонов, которые наблюдались в сопряженной области низкоорбитальными спутниками NOAA POES и MetOp. Расчеты указывают на режим сильной диффузии, что согласуется с данными измерений на низкоорбитальных спутниках, которые показывают примерное равенство потоков захваченных и высыпающихся частиц. Расчеты инкремента указывают на то, что в области частот ЭМИЦ волн, зарегистрированных на магнитосферных спутниках вблизи экваториальной плоскости, инкремент может иметь как положительные значения (что соответствует генерации непосредственно в силовой трубке, где находится спутник), либо быть отрицательным (что соответствует генерации в ее ближайшей окрестности).

Публикации:

Yahnin A.G., Popova T.A., Demekhov A.G., Lubchich A.A., Matsuoka A., Asamura K., et al. Evening Side EMIC Waves and Related Proton Precipitation Induced by a Substorm // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2021. — V.126, No.7. <https://doi.org/10.1029/2020JA029091>

Попова Т.А., А.Г. Демехов, А.Г. Яхнин. Протонные высыпания и электромагнитные ионно-циклотронные волны, обусловленные суббуревой инжекцией. Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т. 85, № 3, С. 404–409 (2021). DOI: 10.31857/S0367676521030212

Короткопериодические (с периодами 2 или 4 с) ОНЧ излучения с неизменным от импульса к импульсу дрейфом частоты впервые одновременно наблюдались в магнитосфере (на спутнике Van Allen Probe А вблизи геомагнитного экватора) и на наземных станциях (Каннуслахто и Ловозеро). Период следования импульсов и их задержка на Земле относительно спутника согласуются с каналированным распространением свистовых волн вдоль геомагнитного поля между сопряженными областями ионосферы. Наблюдались два режима, первый из которых соответствует одному волновому пакету, осциллирующему вдоль силовой линии, а второй — двум волновым пакетам, симметрично распространяющимся в магнитосфере и одновременно встречающимся на экваторе. Оба режима согласуются с механизмом пассивной синхронизации мод в магнитосферном циклотронном мазере. Эти наблюдения можно интерпретировать как первое экспериментально зарегистрированное переключение режимов пассивной синхронизации мод в магнитосферном циклотронном мазере.

Публикация:

Demekhov A.G., Titova E.E., Manninen J., Nikitenko A.S., Pilgaev S.V. Short Periodic VLF Emissions Observed Simultaneously by Van Allen Probes and on the Ground // *Geophysical Research Letters*. — 2021. — V.48, No.20. — e2021GL095476. <https://doi.org/10.1029/e2021GL095476>

Представлены экспериментальные свидетельства важности свистовых волн, распространяющихся в каналированном режиме, для эффективного высыпания релятивистских электронов в ионосферу. Для этого использованы одновременные наблюдения свистовых волн на Земле и вблизи геомагнитного экватора и наблюдения электронных высыпаний с помощью низкоорбитальных наноспутников ELFİN CubeSat. Показано, что каналированные волны (наблюдаемые на Земле) эффективно рассеивают релятивистские электроны в конус потерь, в то время как неканалированные волны (которые не наблюдаются на Земле, но наблюдаются на спутниках) высыпают только электроны с меньшими энергиями (< 150 кэВ). Полученный результат указывает на то, что необходимо более внимательное, в том числе, статистическое исследование роли каналированных волн в высыпаниях релятивистских электронов, и такие волны, возможно, должны быть отдельно учтены в моделях динамики радиационных поясов.

Публикация:

Artemyev A.V., Demekhov A.G., Zhang X.-J., Angelopoulos V., Mourenas D., Fedorenko Y.V., et al. Role of ducting in relativistic electron loss by whistler-mode wave scattering // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2021. — V.126. e2021JA029851. <https://doi.org/10.1029/e2021JA029851>

Исследовано влияние реальной структуры волнового пакета электромагнитных ионно-циклотронных волн в радиационных поясах Земли на высыпания релятивистских электронов. С помощью автоматического алгоритма в данных спутника Van Allen Probe В отобраны дискретные элементы (волновые пакеты) и определены профили их амплитуды и частоты. Рассмотрены пакеты ЭМИЦ волн с повышающейся частотой в протонной полосе (выше

гирочастоты гелия) с максимальной амплитудой 1.2–1.6 нТл. Резонансное взаимодействие этих волновых пакетов с релятивистскими электронами (1.5–9 МэВ) исследовано с помощью численных расчетов. Высыпания в конус потерь формируются в результате как линейных, так и нелинейных процессов. Для энергий 2–5 МэВ потоки высыпающихся частиц близки к пределу сильной диффузии. На эволюцию высыпаний влияет генерация более высокочастотных волн на заднем фронте волнового пакета около экватора и диссипация низкочастотных волн в области циклотронного резонанса ионов He^+ на переднем фронте. Модуляция амплитуды волнового пакета существенно изменяет энергетический спектр высыпающихся частиц на интервалах времени меньше 1 минуты. Для интервалов длительностью 10–15 с хороший количественный результат дает аппроксимация каждого амплитудного пика в волновом пакете гауссовым профилем и линейная аппроксимация частотного дрейфа. В рамках данной НИР по этому результату проведен отбор волновых пакетов в данных спутника Van Allen Probe В с помощью разработанного ранее автоматического алгоритма.

Публикация:

Grach V.S., Demekhov A.G., Larchenko A.V. Resonant interaction of relativistic electrons with realistic electromagnetic ion–cyclotron wave packets // *Earth, Planets and Space*. — 2021. — V.73, No.6. 129. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01453-w>

4. Численное моделирование физических процессов в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере Земли.

С помощью численной модели показано, что в возмущенных условиях возможно формирование тонкого токового слоя в ближней части хвоста магнитосферы Земли за счет встречных потоков ионов кислорода ионосферного происхождения. Получены равновесные конфигурации подобного токового слоя, которые вполне согласуются с известными экспериментальными данными.

Публикации:

Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Мерзлый А.М., Зеленый Л.М. Роль ионов кислорода в структуре токового слоя ближнего хвоста магнитосферы Земли // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48, № 3 (в печати)

Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Зеленый Л.М. Возможность образования токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы потоками ионов кислорода // *Известия РАН. Серия физическая*. 2022, Т. 86, № 3 (в печати)

Было продолжено совершенствование методики численного интегрирования уравнений Максвелла в ионосферной плазме в задаче о распространении электромагнитных волн и широкополосных сигналов в диапазонах от УНЧ до КВ и УКВ.

Публикация:

Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Распространение электромагнитных волн в области высоких широт при различном состоянии ионосферы на частотах системы радионавигации РСДН-20 (АЛЬФА) // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2021, том 61, № 3, с. 366–378

5. Обработка материалов оптических и магнитометрических наблюдений, выполненных в обсерваториях ПГИ.

Продолжалась первичная обработка обсерваторских наблюдений ПГИ на камерах всего неба. Проводилась обработка магнитометрических данных из обсерваторий Ловозеро, Лопарская, Баренцбург. Данные в цифровом виде подготавливались для передачи в базу данных IMAGE. Опубликовано 4 выпуска сборника данных наблюдений ПГИ:

1. «PGI Geophysical data. October, November, December 2020» // Ed. V. Vorobjev. - Murmansk, Apatity: PGI-2021.

2. «PGI Geophysical data. January, February, March 2021» // Ed. V. Vorobjev. -Murmansk, Apatity: PGI – 2021.

3. «PGI Geophysical data. April, May, June 2021» // Ed. V. Vorobjev. -Murmansk, Apatity: PGI-2021.

4. «PGI Geophysical data. July, August, September 2021» // Ed. V. Vorobjev. -Murmansk, Apatity: PGI-2021.

Научная новизна результатов и их значимость

Все изложенные выше результаты опубликованы в рецензируемых изданиях, в том числе, в журналах первого и второго квартилей (Q1 и Q2), что подтверждает их новизну и оригинальность.

Возможность практического применения

Полученные результаты могут найти применение при разработке моделей динамики радиационных поясов и кольцевого тока в магнитосфере Земли, методов прогнозирования влияния высыпающихся в ионосферу энергичных частиц на состояние ионосферы, способов дистанционного определения параметров стратосферных облаков по рассеянному ими свету, методик расчета распространения радиоволн в околоземном космическом пространстве.

Заключение

В 2021 г. работа по теме НИР велась по всем 5 разделам плана.

По данным низкоорбитальных спутников DMSP рассмотрено давление высыпающихся протонов в дневной области, включая область каспа, низкоширотного пограничного слоя, мантии, обнаружено повышение давления в дневной области в локализованном по MLT секторе; обоснована возможность оценки энергетических спектров потоков высыпающихся электронов, формирующих лучистые структуры в полярных сияниях, по данным триангуляционных наблюдений аппаратурой, регистрирующей излучение в широком интервале длин волн (380–580 нм), восстановлены энергетические спектры потоков высыпающихся электронов, ответственных за формирование лучистых структур в полярных сияниях; найдены характеристики светорассеяния, связанные с распределением размеров частиц в полярных стратосферных облаках; сопоставлены признаки суббури и суббуревых активизаций в ближней магнитосфере и на земной поверхности; проведено сравнение признаков полярных суббурь, развивающихся на фоне различных геофизических условий; представлены наблюдения, позволяющие объяснить отсутствие дропаута релятивистских электронов на главной фазе мощной геомагнитной бури; впервые показана возможность генерации ЭМИЦ волн непосредственно в области суббуревой инжекции; проведены расчеты

коэффициента диффузии энергичных протонов и инкремента развития ионно-циклотронной неустойчивости по данным наблюдений параметров плазмы и полей в экваториальной плоскости магнитосферы, расчеты коэффициента сопоставлены с параметрами высыпающихся протонов; получено экспериментальное подтверждение переключения режимов пассивной синхронизации мод в магнитосферном циклотронном мазере; показано, что каналированные волны (наблюдаемые на Земле) эффективно рассеивают релятивистские электроны в конус потерь, в то время как неканалированные волны (которые не наблюдаются на Земле, но наблюдаются на спутниках) высыпают только электроны с меньшими энергиями; резонансное взаимодействие пакетов ЭМИЦ волн с релятивистскими электронами (1.5–9 МэВ) исследовано с помощью численных расчетов, показано, что высыпания в конус потерь формируются в результате как линейных, так и нелинейных процессов; на основе результатов численного моделирования распространения электромагнитных волн ОНЧ-диапазона в области высоких широт получены амплитудные и фазовые характеристики сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20), измеряемые на поверхности Земли в условиях сильной геомагнитной суббури; сделан вывод о возможности формирования тонкого токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы в возмущенных условиях за счет потоков ионов кислорода ионосферного происхождения, когда магнитосферные протоны либо являются фоном, либо их потоки относительно слабы.

Основные результаты опубликованы или направлены в печать. Все такие результаты являются результатами мирового уровня и получены впервые. В 2021 г. по тематике НИР опубликовано 24 статьи в рецензируемых российских и зарубежных журналах.

ТЕМА: Изучение особенностей распространения крайне низкочастотных волн искусственного и естественного происхождения в высоких широтах (включая Арктическую зону) (FMES-2021-0007)

Научный руководитель: к.ф.-м.н. В.А. Любчик

Отв. исполнители: Н.В. Иванов, д.г.-м.н. Э.В. Шипилов

Исследования по теме «Изучение особенностей распространения крайне низкочастотных волн искусственного и естественного происхождения в высоких широтах (включая Арктическую зону)» проводятся в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 – 2030 годы), раздел фундаментальных и поисковых исследований 1.3.6.7 «Радиофизические и акустические методы диагностики окружающей среды, связи и локации».

Главной целью исследований являются получение новых знаний об особенностях возбуждения и распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона в высоких широтах и возможности практического применения полученных результатов. Работы в рамках темы проводились по четырем направлениям: теоретические и экспериментальные исследования поляризационных характеристик резонансов естественных электромагнитных полей с целью их интерпретации и изучения внешней ионосферы, определение влияния неоднородной структуры подстилающей поверхности литосферы на распространение электромагнитных волн КНЧ-диапазона, исследование применимости импедансного подхода в высоких широтах и изучение влияния ионосферы на распространение радиоволн.

Исследования основаны на данных, полученных как в ходе экспериментальных работ, так и с использованием научной инфраструктуры и сети наблюдательных пунктов ПГИ. Результаты мониторинга и регулярных наблюдений объединены и систематизированы в банки данных, что позволяет проводить изучение явлений по результатам длительных серий наблюдений. Были получены следующие основные результаты.

1. Экспериментальные и теоретические исследования поляризационных характеристик резонансов естественных электромагнитных полей и их интерпретация.

Шумановский и альвеновский резонансы являются основными особенностями, проявляющимися в спектрах естественного электромагнитного поля в диапазоне от 0.1 Гц до 30 Гц. В спектрах электромагнитного поля эти естественные резонансы проявляются в виде немонотонного характера зависимости амплитуды наблюдаемого поля от частоты.

При изучении приземного электромагнитного шума, принято считать, что большая его часть обусловлена глобальной грозовой активностью, вклад прочих возможных источников шума обычно считался незначительным. В результате проведенных исследований поляризационных спектральных характеристик, в частности коэффициента эллиптичности R . Было установлено, что данный подход не применим ко всему диапазону рассматриваемых частот (0.1-30 Гц).

Модуль коэффициента эллиптичности, функция, определяемая главным образом геометрическим расположением и относительной взаимной мощностью ансамбля источников. Несмотря на сложность, для высокоширотной области наблюдений (Кольский полуостров), подобную задачу практически всегда можно свести к двум основным источникам, поскольку для южноамериканского и азиатского грозовых центров эффективные трассы распространения фактически совпадают (рис. 33).

Расчеты, сделанные для группы приземных вертикальных электрических диполей, показывают хорошее совпадение поляризационных характеристик с наблюдаемыми в окрестностях первых двух Шумановских резонансов (~7-9, 13-14 Гц). Однако в других частотных областях часто наблюдаются серьезные качественные расхождения.

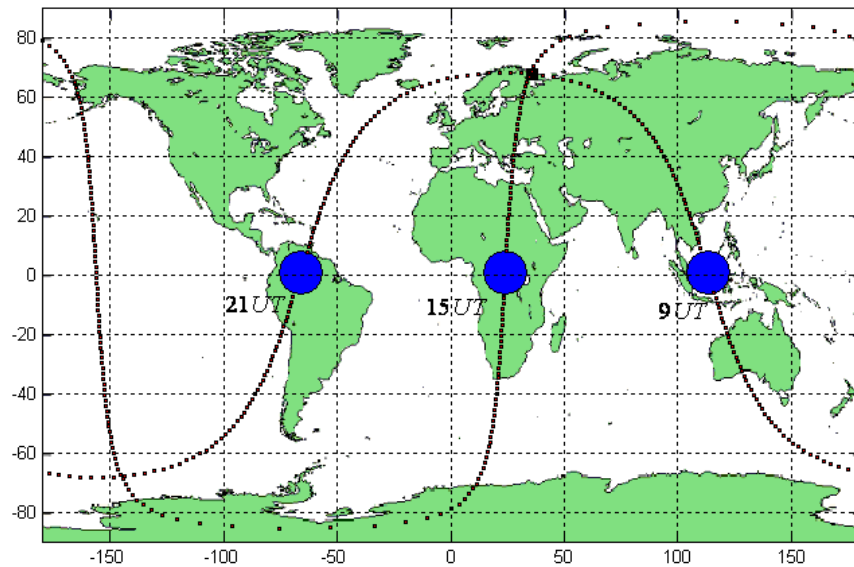


Рис. 33. Трассы распространения для трех основных грозовых центров относительно обсерватории “Ловозеро”

Знак коэффициента эллиптичности R , (определяющий направление вращения вектора напряженности) не зависит от характеристик источников и определяется только свойствами ионосферы над областью приема. Для модели приземных вертикальных диполей нами установлено, что знак R полностью определяется знаком разницы единицы и отношения модулей импедансов необыкновенной и обыкновенных волн. Усредненная для нескольких осенних периодов функция для дня и ночи, посчитанная по модели IRI, приведена на рис. 34. Хорошо видны характерные для обоих случаев области смены знака. Общая положительная область ниже 1 Гц и положительная область выше 7 Гц.

Данное поведение знака коэффициента эллиптичности должно наблюдаться практически всегда, если предполагать, что наблюдаемое излучение создается в основном приземными грозовыми источниками, однако почти всегда этого не происходит.

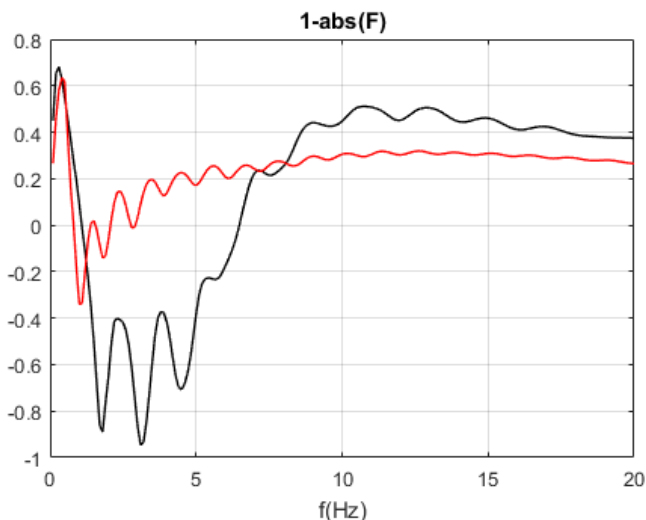


Рис. 34. Функция, определяющая знак коэффициента эллиптичности. Красная линия – день, черная – ночь.

Черными рамками рис. 35 выделены области явных “аномалий”. Также к подобным “аномалиям” следует отнести всю часть спектра ниже 1 Гц. Объяснить данное поведение знака коэффициента эллиптичности оставаясь в рамках модели приземных грозовых источников невозможно.

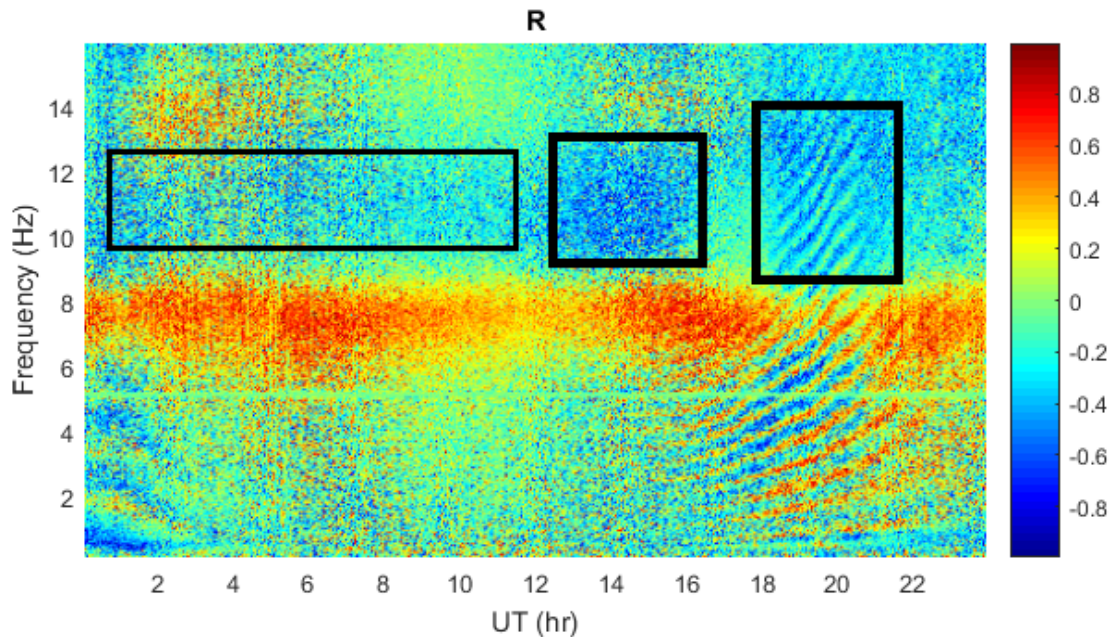


Рис. 35. Спектрограммы коэффициента эллиптичности приземного магнитного шума.

Для объяснения наблюдаемых расхождений предложена гипотеза. Пусть имеется дополнительный источник приземного шума, находящийся на высотах, превышающих 100-150 км. Рассчитать точно излучение при столь малом количестве информации невозможно, но можно качественно оценить вклад источников. Нижняя ионосфера мало прозрачна для волн исследуемого диапазона при распространении снизу вверх и значительно более проницаема сверху, что делает ее “полупрозрачным зеркалом”. Область ионного гирорезонанса, делает эту проницаемость существенно различной для двух поляризаций.

Излучение рассматриваемого источника проникает через верхнюю “полупрозрачную” стенку и попадая в “ловушку” колеблется вместе и подобно полю приземных источников. Однако в нем, в отличие от приземных источников, поле обыкновенной поляризации будет существенно преобладать для областей частот ниже 1 Гц и частот выше 7 Гц. Таким образом, если предположить, что поле “ионосферного” источника сопоставимо по мощности с полями грозового происхождения в указанных областях частот, это будет объяснять “аномалии”, наблюдаемые в спектрах коэффициента эллиптичности. В окрестностях шумановских резонансов “грозовая” часть шума сильно возрастает, что делает влияние на эти области спектра “ионосферной” части несущественным. Для данных частотных областей, можно полагать излучение чисто “приземным”.

Для анализа спектральных поляризационных характеристик в случае модели приземных грозовых источников введем “ионосферную поляризационную функцию”, определяемую нами как отношение импедансов необыкновенной и обыкновенной поляризаций нормальных волн. Модуль данной функции, в случае преобладания приземных источников, удобно получать из экспериментальных данных с помощью коэффициентов Стокса (рис. 36).

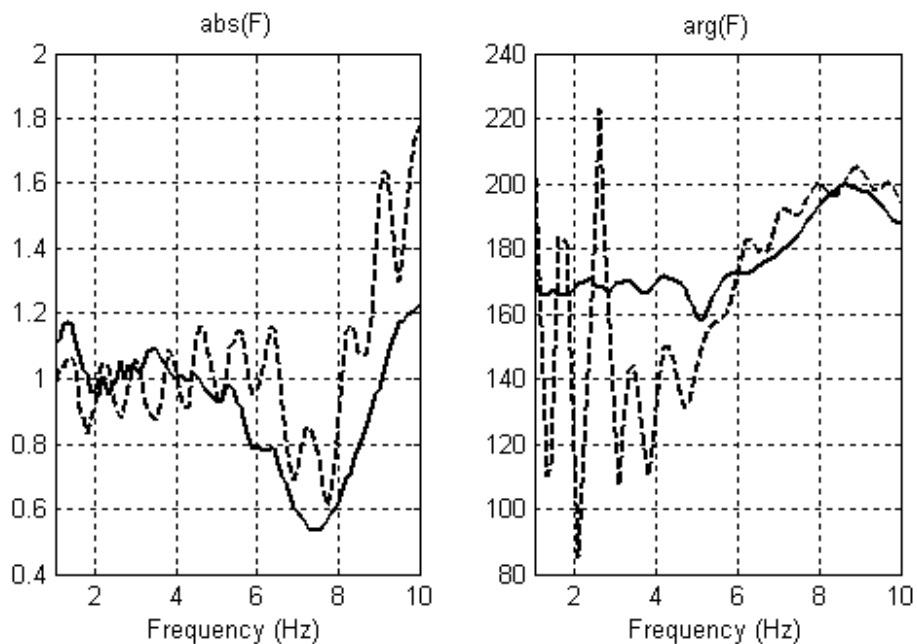


Рис. 36. Слева изображен модуль ионосферной поляризационной функции, справа половина ее аргумента. Сплошная и пунктирная линии – день (10UT) и ночь (20UT) соответственно. По данным обсерватории “Ловозеро” 080829.

Было показано, что “осциллирующая” часть функции определяется основными параметрами внешней ионосферы (высотными профилями средней ионной массы и электронной концентрации) и не зависит от мощностей и распределения грозowych источников, что делает ее наиболее удобным инструментом мониторинга внешней ионосферы.

2. Исследование влияния неоднородной структуры подстилающей поверхности на возбуждение крайне низкочастотных волн.

В 2021 году были продолжены работы по интерпретации результатов эксперимента по электромагнитному зондированию земной коры полуостровов Средний и Рыбачий с применением мощного контролируемого источника электромагнитных волн КНЧ-диапазона, проводившегося в рамках проекта FENICS-2019. Целью исследования на данном этапе являлась оценка влияния крупных геоэлектрических неоднородностей земной коры, а именно, мощных тектонических разломов, на процесс распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона от контролируемого источника.

В ходе эксперимента выполнялись измерения горизонтальных компонент электромагнитных полей от искусственных и естественных источников в районе полуостровов Рыбачий и Средний. Сильные искажения кривых магнитотеллурических зондирований свидетельствуют о существенном влиянии геоэлектрических неоднородностей, в частности, мощных зон тектонических разломов, на процесс распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона в земной коре. Кроме того, и в случае ЭМЗ с контролируемым источником подобранные ранее одномерные модели геоэлектрических разрезов земной коры в районах полуостровов Рыбачий и Средний, представленные на рис. 37 (кривые 3), обеспечивали хорошие совпадения теоретически рассчитанных значений с экспериментальными данными только для отношений полного горизонтального электрического поля к полному горизонтальному магнитному полю. Но если рассматривать амплитуды отдельных компонент электромагнитного поля, то для частот генерируемого

электромагнитного поля выше 5 Гц модельные значения были почти на порядок меньше, чем экспериментально измеренные амплитуды, как представлено в таблице 2.

С целью изучения влияния крупных геоэлектрических неоднородностей земной коры на процесс распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона было выполнено трехмерное моделирование распределения электропроводности в исследуемом районе. Опираясь на одномерные модели геоэлектрических разрезов осадочного чехла полуостровов Рыбачий и Средний, была построена следующая модель литосферы данного района.

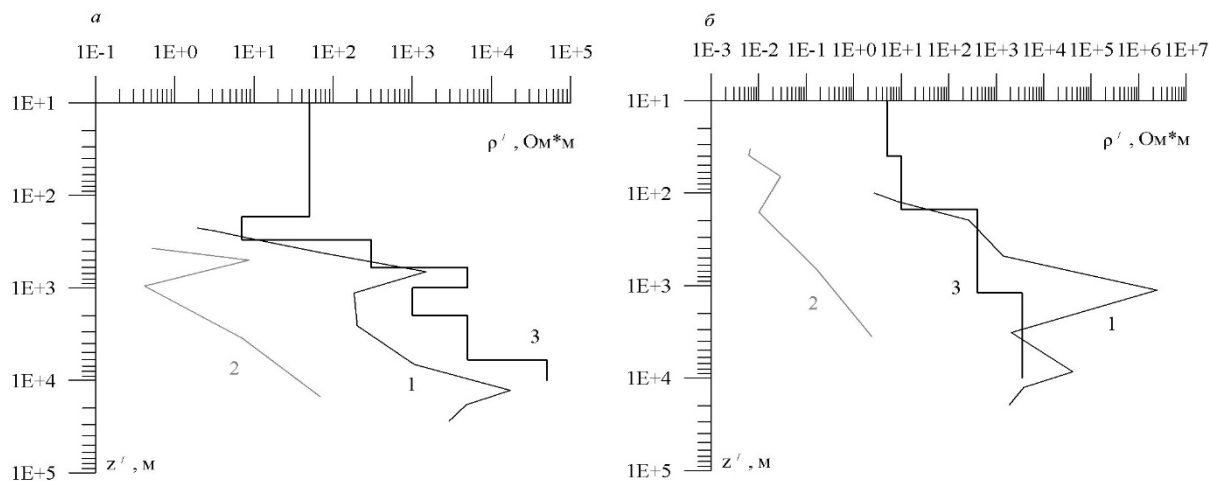


Рис. 37. Графики зависимости действующего сопротивления среды ρ' от действующей глубины z' , построенные по результатам дифференциальной трансформации Молочного-Ле Вьета экспериментальных данных: *а* – для точки наблюдения на полуострове Рыбачий, *б* - для точки наблюдения на полуострове Средний. Кривые 1 соответствуют результатам трансформации для данных ЭМЗ с контролируемым источником, кривые 2 соответствуют результатам трансформации для данных МТЗ, кривые 3 демонстрируют подобранные одномерные модели геоэлектрического разреза среды.

Для осадочного чехла севернее системы тектонических разломов Троллефьорд-Рыбачий-Кильдин (ТРК) модель состояла из верхнего слоя, соответствующего породам собственно полуострова Рыбачий, мощностью 200 м с сопротивлением 2 Ом·м, относительно высокоомного слоя мощностью 1000 м с сопротивлением 5000 Ом·м и слоя с относительно пониженным сопротивлением 1000 Ом·м мощностью 6000 м. Сопротивление кристаллического фундамента составляло 10000 Ом·м. Для области между сбросом Карпинского и системой разломов ТРК модель земной коры состояла также из верхнего слоя мощностью 200 м с сопротивлением 2 Ом·м, соответствующего породам собственно полуострова Средний, второго слоя осадочных пород мощностью 1000 м с сопротивлением 500 Ом·м и третьего слоя мощностью 6000 м с сопротивлением 1000 Ом·м, относящегося к верхней части кристаллического фундамента, нижняя часть фундамента имела сопротивление 10000 Ом·м. Эта модель базировалась также и на результатах бурения скважины «Пограничная-1». Удельное электрическое сопротивление пород Балтийского щита составляло 10000 Ом·м. Удельная электропроводность моря в модели была принята 2 См/м, глубина слоя морской воды – 200 м. Тектонические зоны системы ТРК и сброса Карпинского, разделяющие Балтийский щит, полуострова Рыбачий и Средний, моделировались узкими линейными элементами шириной 1000 м с удельным сопротивлением 1 Ом·м, глубина погружения разломов была принята 10000 м. На рис. 38 представлен горизонтальный план построенной модели.

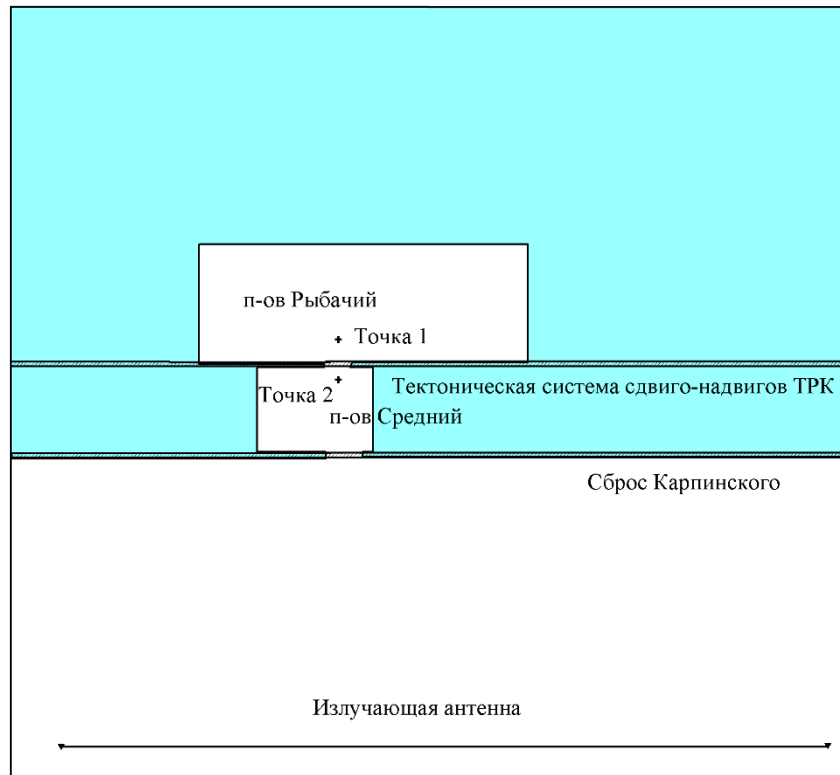


Рис. 38. Горизонтальный план трехмерной модели района полуостровов Рыбачий и Средний. Крестами обозначены точки, для которых рассчитывались модельные значения горизонтальных компонент электромагнитного поля.

При моделировании использовался метод сеточной аппроксимации уравнений для векторного и скалярного потенциалов электромагнитного поля. В этом методе электрические и магнитные поля представлены в виде суммы нормального (первичного) поля E_0 , H_0 , обусловленного контролируемым источником, и аномального поля E , H , связанного с избыточной электропроводностью $\Delta\sigma$ в некоторых ограниченных областях среды. Для аномального электрического поля вводятся векторный A и скалярный φ потенциалы.

$$E = \vec{A} + \nabla\varphi$$

Значения аномального магнитного поля H определяются векторным потенциалом A :

$$\vec{H} = (i\omega\mu)^{-1} \nabla \times \vec{A}$$

Для однозначного определения векторного потенциала используется калибровка Кулона. Тогда уравнение Гельмгольца для аномального электрического поля можно преобразовать в систему дифференциальных уравнений для векторного A и скалярного φ потенциалов:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} + i\omega\mu\sigma(\vec{A} + \nabla\varphi) &= -S_E \\ \nabla \cdot (\sigma\vec{A}) + \nabla \cdot (\sigma\nabla\varphi) &= -(i\omega\mu)^{-1} \nabla \cdot S_E \end{aligned}$$

где $S_E = i\omega\mu(\sigma - \sigma_0)\vec{E}_0$,

$\sigma - \sigma_0$ – избыточная электропроводность в аномальных зонах среды, μ – магнитная проницаемость среды, ω – круговая частота электромагнитного поля.

В результате сеточной аппроксимации данной системы дифференциальных уравнений полученная система линейных уравнений будет характеризоваться ленточной матрицей со свойством сильной диагональной доминантности, что значительно упрощает решение системы. Система линейных уравнений с диагонально доминантной матрицей решалась с

помощью итерационного метода Зейделя. Моделирование проводилось для трех частот генерируемого электромагнитного поля $f = 0.642, 6.422, 64.22$ Гц.

Результаты моделирования показали, что конфигурация высокопроводящих зон тектонических разломов и присутствие морской воды с высокой электропроводностью, окружающей полуострова Средний и Рыбачий с трех сторон, приводит к образованию замкнутых макромасштабных контуров, в которых генерируются вторичные аномальные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника. Итоговые модельные значения получаются как разность первичного и вторичных электромагнитных полей. Эффект возникновения замкнутых контуров оказывает существенное влияние на результаты ЭМЗ в исследуемом районе. Полученные модельные значения амплитуд компонент электромагнитного поля, в целом, согласуются с экспериментально измеренными величинами. При этом для частот 6.422 и 64.22 Гц модельные значения амплитуд компонент электромагнитного поля, рассчитанные для трехмерной модели, почти на порядок выше, чем модельные значения, рассчитанные для одномерных моделей, как показано в таблице 2. Наблюдаемые некоторые расхождения между модельными значениями и экспериментально измеренными величинами можно объяснить грубостью модели земной коры в районах полуостровов Рыбачий и Средний.

В целом работа в этом направлении нацелена на исследование строения литосферы и геологической структуры переходной области от пород кристаллического Балтийского щита к породам осадочного чехла южной окраины Баренцевоморской плиты с применением электромагнитных геофизических методов. Проведение ЭМЗ с контролируемым источником электромагнитных волн КНЧ-диапазона в данном районе было осуществлено впервые и является новым этапом в изучении особенностей глубинного строения исследуемых районов.

Полученные результаты интерпретации экспериментальных работ на полуостровах Рыбачий и Средний демонстрируют, что в сложных геологических условиях переходной зоны, характеризующейся наличием мощных зон тектонических нарушений, предпочтительнее использовать метод электромагнитных зондирований с контролируемым источником. Применение мощных контролируемых источников позволяет надежно определять параметры геоэлектрического разреза земной коры.

Таблица 2. Модельные и экспериментально измеренные значения амплитуд компонент электромагнитного поля в точках наблюдения на полуостровах Рыбачий и Средний.

	Результаты моделирования для полуострова Рыбачий (точка 1)			Результаты моделирования для полуострова Средний (точка 2)		
	f, Гц			f, Гц		
	0.642	6.422	64.22	0.642	6.422	64.22
H_x	6.21E	7.35E	1.27E	3.35E	1.05E	9.48E
экспериментальные значения, А/м	$-07 \pm 1.84E-07$	$-08 \pm 1.3E-08$	$-08 \pm 2.11E-09$	$-07 \pm 1.64E-07$	$-07 \pm 5.91E-08$	$-09 \pm 2.72E-09$
H_{mx} 1D-модельные значения, А/м	$2.78E-07$	$2.16E-08$	$5.58E-09$	$3.53E-07$	$2.83E-08$	$3.69E-09$

H _{mx} 3D- модельные значения, А/м	5.12E -07	1.42E -07	2.65E -08	4.22E -07	1.91E -07	3.32E -08
H _y экспериментальны е значения, А/м	1.06E ± 6.1E- 07	3.74E ± 2.64E -08	1.13E ± 6.29E -09	1.54E ± 1.07E -07	5.45E ± 1.02E -07	1.54E ± 2.61E -09
H _{my} 1D- модельные значения, А/м	6.29E -07	5.07E -08	1.31E -08	7.87E -07	6.74E -08	8.76E -09
H _{my} 3D- модельные значения, А/м	2.34E -06	8.62E -07	1.77E -07	3.18E -06	1.17E -06	2.30E -07
E _x экспериментальны е значения, В/м	6.07E -09 ± 1.95E -11	1.09E -08 ± 6.86E -11	1.31E -08 ± 7.36E -10	6.79E -08 ± 2.46E -10	2.08E -08 ± 1.65E -10	8.14E -09 ± 1.32E -10
E _{mx} 1D- модельные значения, В/м	4.75E -08	1.66E -09	1.39E -09	4.05E -08	3.01E -09	5.00E -10
E _{mx} 3D- модельные значения, В/м	2.91E -08	1.26E -08	6.16E -09	3.41E -08	1.71E -08	8.01E -09
E _y экспериментальны е значения, В/м	7.23E -08 ± 3.28E -10	1.10E -08 ± 6.53E -11	9.85E -10 ± 3.36E -10	4.36E -08 ± 1.6E- 10	1.25E -08 ± 1.03E -10	1.89E -09 ± 1.37E -10
E _{my} 1D- модельные значения, В/м	2.08E -08	7.22E -10	5.93E -10	1.88E -08	1.26E -09	2.10E -10
E _{my} 3D- модельные значения, В/м	1.20E -08	1.68E -09	9.23E -10	2.15E -08	2.77E -09	1.15E -09

Полученные результаты экспериментальных работ по ЭМЗ земной коры полуостровов Средний и Рыбачий опубликованы в работах.

3. Исследование применимости импедансного подхода в высоких широтах.

Проведение работ методом МТЗ в высокоширотных районах Арктики имеет ряд особенностей, связанных с распределением источников, так как используются естественные электромагнитные поля не только от грозových источников, расположенных, в основном, в экваториальной области Земли, но и от магнитосферных источников, например, системы горизонтальных полярных токов (электроджетов), текущих в высокоширотной ионосфере.

С целью изучения вопроса о применимости импедансного подхода в высоких широтах вблизи магнитосферных источников естественного электромагнитного поля были проведены модельные расчеты горизонтальных компонент поля на земной поверхности от заданных источников. В качестве источников поля рассматривались вертикальный магнитный диполь, горизонтальный электрический диполь и горизонтальная длинная токовая линия длиной 300 км. Горизонтальный электрический диполь и длинная токовая линия были ориентированы вдоль оси абсцисс, горизонтальные компоненты электромагнитного поля рассчитывались для точки на земной поверхности, сдвинутой на 36 км по оси ординат. Вследствие близости источника поля от точки наблюдения использовалась горизонтально-слоистая модель ионосферы, представленная в работе. Модель состоит из четырех слоев: нижний слой мощностью 30 км и с удельным сопротивлением 10^{14} Ом·м, второй слой, расположенный в диапазоне высот 30 - 60 км с удельным сопротивлением 10^{12} Ом·м, третий слой в диапазоне высот 60 - 85 км с удельным сопротивлением 10^8 Ом·м и четвертый слой с удельным сопротивлением 10^5 Ом·м на высотах выше 85 км. Источники располагались на высоте 85 км. Модельные расчеты проводились для четырех частот электромагнитного поля $f = 0.064, 0.642, 6.422, 64.22$ Гц. Модельные значения импеданса Z_{xy} пересчитывались в значения кажущегося сопротивления ρ_k по формуле:

$$\rho_k = \frac{|Z_{xy}|^2}{\omega\mu},$$

где ω – круговая частота электромагнитного поля, μ – магнитная проницаемость среды.

Модельные вычисления показали, что диапазон применимости импедансного подхода сильно зависит от электропроводности верхнего слоя земной коры. Так при удельном сопротивлении нижнего полупространства равном 10^4 Ом·м, что характерно для пород кристаллического Балтийского щита, импедансный подход в определении геоэлектрических параметров земной коры применим для частот выше 6 Гц для всех трех типов моделировавшихся источников естественных полей в высокоширотной ионосфере, а для горизонтального электрического диполя и длинной токовой линии - для частот выше 0.6 Гц (рис. 39а).

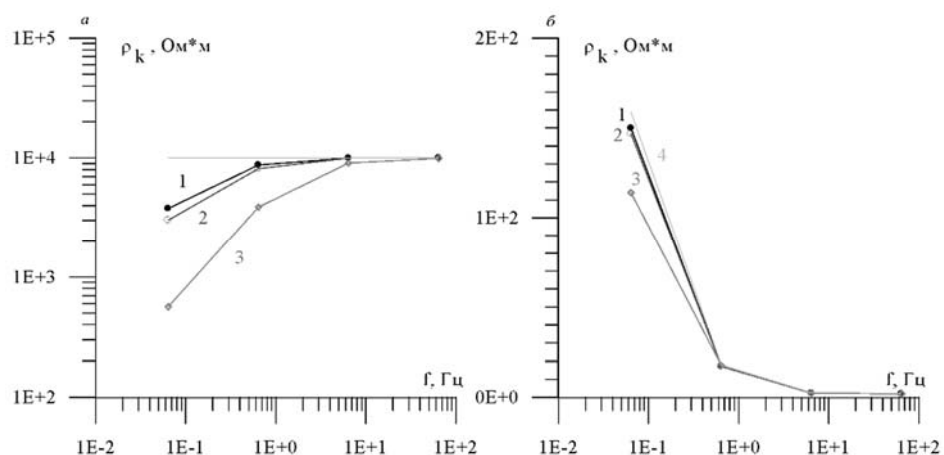


Рис. 39. Графики кажущегося сопротивления ρ_k , вычисленные по значениям импеданса Z_{xy} для горизонтально-слоистой модели ионосферы: *a* – для однородного подстилающего нижнего полупространства с удельным сопротивлением 10^4 Ом·м, *б* – для горизонтально-слоистой модели земной коры. Кривые 1 соответствуют модельному источнику естественных электромагнитных полей в виде длинной токовой линии, кривые 2 - горизонтальному электрическому диполю, кривые 3 – вертикальному магнитному диполю. Кривая 4 - график кажущегося сопротивления ρ_k , рассчитанный через кривые нормального поля.

Для горизонтально-слоистой модели земной коры, характерной для осадочного чехла южной окраины Баренцевоморской плиты, с удельным сопротивлением верхнего слоя $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ модельные величины кажущегося сопротивления, определенные через значения импеданса, хорошо согласуются с кажущимся сопротивлением ρ_k , определенным через кривые нормального поля, для частот выше 0.6 Гц , а для горизонтального электрического диполя и длинной токовой линии и на более низких частотах (рис. 39б).

Таким образом, модельные вычисления показали, что применение метода МТЗ в высокоширотных районах Арктики для электромагнитных зондирований низкоомного осадочного чехла вполне оправданно для используемого на практике диапазона частот.

4. Теоретические и экспериментальные исследования влияния высокоширотной ионосферы на распространение радиоволн крайне низкочастотного диапазона.

Мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в F-области ионосферы оказывают существенное влияние на распространение радиоволн КНЧ-диапазона. На данном этапе исследований работа посвящена выявлению таких неоднородностей и определению их характеристик. В дальнейшем планируется провести изучение распространения радиоволн КНЧ-диапазона в неоднородной ионосфере.

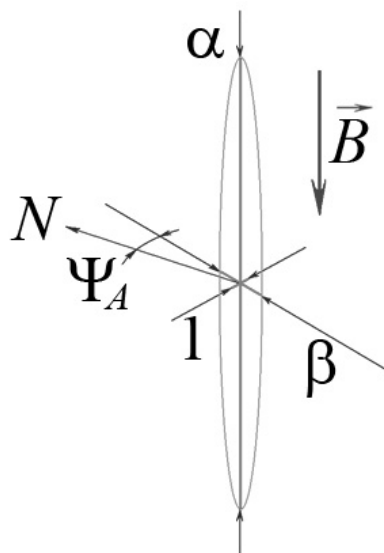


Рис. 40. Условная модель поперечно-анизотропной мелкомасштабной неоднородности электронной плотности в F-области ионосферы. α – вытянутость в продольном направлении по отношению к наименьшей поперечной оси, β – вытянутость в поперечном направлении, Ψ_A – ориентация поперечной анизотропии, измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север.

Методом радиопросвечивания ионосферы сигналами ИСЗ с последующей математической обработкой флуктуаций амплитуды радиосигнала, принятого единичным наземным приемником (расположен в МГУ им. М.В. Ломоносова), в различные дни и время суток (преимущественно ночное) были определены параметры анизотропных мелкомасштабных неоднородностей электронной плотности в F-области среднеширотной ионосферы. Были численно определены следующие параметры анизотропии (рис. 40): вытянутость неоднородностей вдоль геомагнитного поля α (продольная анизотропия), вытянутость поперек геомагнитному полю β (поперечная анизотропия), ориентация поперечной анизотропии Ψ_A . В наблюдательный период с октября 2008 г. по март 2012 г. при спокойных геомагнитных условиях в 426 случаях было установлено, что мелкомасштабные

неоднородности вытянуты вдоль геомагнитного поля в несколько раз больше, чем поперек ему. Поперечная анизотропия β также наблюдалась в каждом из 426 случаев, т.е. среднеширотные неоднородности над московским регионом являются поперечно-анизотропными. Ориентация поперечной анизотропии Ψ_A в каждом случае была определена с точностью несколько градусов и сопоставлена с направлением горизонтального ветра Ψ_W , рассчитанного с помощью модели NWM07 индивидуально для каждого случая. Численное сопоставление значений Ψ_A и Ψ_W в условиях постоянного (для различных высот F-слоя) направления ветра показало их хорошее согласие, т.е. мелкомасштабные неоднородности вытянуты вдоль направления горизонтального ветра. Численное сопоставление Ψ_A и Ψ_W в условиях не постоянного (для различных высот F-слоя) направления ветра показало, что наименьшее различие между Ψ_A и Ψ_W наблюдается на высотах ниже 300 км, предполагаемого максимума F-слоя.

Научная новизна результатов и их значимость

Все полученные результаты являются новыми, отвечающими современному уровню радиофизических и геофизических исследований особенностей распространения электромагнитных волн крайне низкочастотного диапазона в высоких широтах. При выполнении работы использованы оригинальные данные, полученные в ходе измерений с применением научной аппаратуры мирового уровня.

В высоких широтах выполнено исследование поляризационных характеристик естественных электромагнитных полей в альвеновском и шумановском резонаторах. Обработаны и систематизированы данные за продолжительный период наблюдений. Было показано, что в окрестностях шумановских резонансов вклад приземных молниевых источников в фоновый магнитный шум становится определяющим. Для анализа спектральных поляризационных характеристик в случае модели приземных грозových источников была предложена новая “ионосферная поляризационная функция”, модуль которой удобно получать из экспериментальных данных. Было показано, что “осциллирующая” часть функции определяется основными параметрами внешней ионосферы (высотными профилями средней ионной массы и электронной концентрации) и не зависит от мощностей и распределения грозových источников, что делает ее наиболее удобным инструментом мониторинга внешней ионосферы.

Выполнена более детальная интерпретация данных проводившегося впервые эксперимента по ЭМЗ земной коры с применением мощного контролируемого источника электромагнитного излучения КНЧ-диапазона в переходной области от пород кристаллического архейского Балтийского щита к породам осадочного чехла южной окраины Баренцевоморской плиты. С целью изучения влияния крупных геоэлектрических неоднородностей земной коры, а именно, мощных тектонических разломов, на результаты экспериментальных измерений в районе полуостровов Рыбачий и Средний было выполнено трехмерное моделирование процесса распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона от контролируемого источника. Рассчитанные модельные значения амплитуд компонентов электромагнитного поля, в целом, хорошо согласуются с экспериментально измеренными данными. Достигнутые результаты исследований имеют важное значение для получения новых знаний о глубинном строении литосферы переходной области, что позволит более обоснованно подойти к тектоническим построениям и геодинамическим реконструкциям эволюции региона.

Возможность практического применения

Полученные результаты исследований резонансов естественных полей в электромагнитном шуме могут найти практическое применение при диагностике и мониторинге ионосферы по данным сети измерителей электромагнитного поля КНЧ-диапазона. Хотя выдвинутые подходы и гипотезы требуют дальнейшего исследования и уточнения, в перспективе они способны расширить существующие знания, касающиеся магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Выполненная интерпретация данных ЭМЗ с контролируемым источником показала целесообразность применения этого метода в сложных геологических условиях переходной зоны Восточно-Европейский кратон - Западно-Арктическая платформа. Применение мощного контролируемого источника электромагнитного поля КНЧ-диапазона позволяет надежно определять основные параметры глубинного строения земной коры в исследуемых районах. В процессе геологической интерпретации экспериментальных данных ЭМЗ полученные результаты дают возможность выделения основополагающих границ раздела земной коры, оценки мощности земной коры и характера ее изменчивости в пределах исследуемого района, на основе чего становится возможным составление глубинной модели строения переходной области. В практическом отношении материалы исследований могут быть использованы для обоснования закономерностей образования и размещения полезных ископаемых, в том числе для оценки углеводородного потенциала осадочных бассейнов, прилегающих к Кольскому полуострову.

Проведенные расчеты по применимости импедансного подхода при определении геоэлектрических параметров земной коры в высоких широтах также имеют важное практическое значение, так как метод МТЗ, основанный на импедансном подходе, широко применяется в практике геофизических работ в Арктических районах.

Накопленные экспериментальные данные, теоретические интерпретации и построенные модели будут использованы при дальнейших исследованиях, проводимых в рамках научной темы.

Заключение

В 2021 году при выполнении научно-исследовательской работы по теме: "Изучение особенностей распространения крайне низкочастотных волн искусственного и естественного происхождения в высоких широтах (включая Арктическую зону)", - получены следующие результаты:

1. На основе анализа суточной динамики поляризационных характеристик электромагнитного шума КНЧ-диапазона показано, что в окрестностях шумановских резонансов вклад приземных молниевых источников в фоновый магнитный шум становится определяющим. Проведен анализ случаев модуляции шумановских резонансных структур альвеновскими. Для данных случаев установлено хорошее совпадение наблюдаемых поляризационных характеристик с расчетными. Предложен метод, основанный на анализе быстромменяющихся по частоте частей спектра, позволяющий устанавливать связь с основными характеристиками внешней ионосферы, такими как средняя масса ионов и электронная концентрация, пригодный для произвольного распределения источников.

2. Была продолжена интерпретация результатов эксперимента по электромагнитному зондированию земной коры на полуостровах Средний и Рыбачий. Выполнено трехмерное моделирование распределения электропроводности в районе полуостровов с целью изучения влияния крупных геоэлектрических неоднородностей земной коры, а именно, мощных

тектонических разломов, на процесс распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона от контролируемого источника. Результаты моделирования показали, что конфигурация зон тектонических разломов, обладающих повышенной электропроводностью, и присутствие морской воды приводит к возникновению замкнутых макромасштабных контуров, в которых генерируются вторичные аномальные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника, что оказывает существенное влияние на результаты измерений амплитуд компонент электромагнитного поля в исследуемом районе.

3. С целью изучения вопроса о применимости импедансного подхода в высоких широтах вблизи магнитосферных источников естественного электромагнитного поля, например, системы горизонтальных полярных токов (электроджетов), были проведены модельные расчеты горизонтальных компонент поля на земной поверхности от заданных источников. В качестве источников поля рассматривались вертикальный магнитный диполь, горизонтальный электрический диполь и горизонтальная длинная токовая линия. Модельные вычисления показали, что диапазон применимости импедансного подхода сильно зависит от электропроводности верхнего слоя земной коры. Так при удельном сопротивлении нижнего полупространства равном 10^4 Ом·м, что характерно для пород кристаллического Балтийского щита, импедансный подход в определении геоэлектрических параметров земной коры применим для частот естественных электромагнитных полей выше 6 Гц.

4. Методом радиопросвечивания ионосферы сигналами ИСЗ были определены параметры анизотропных мелкомасштабных неоднородностей электронной плотности в F-области ионосферы. Было установлено, что ориентация поперечной анизотропии неоднородностей соответствует направлению горизонтального ветра.

В лаборатории применяются уникальные, мирового уровня, образцы научной аппаратуры, которые размещены в обсерваториях и на радиофизических полигонах института, и входящие в наблюдательную сеть ПГИ. Полученные научные данные применяются для выполнения работ как по плану лаборатории, так и всего института. Результаты, полученные в ходе выполнения исследований по тематике госзадания, опубликованы в материалах научных конференций и в рецензируемых научных изданиях.

ТЕМА: Пополнение баз данных и совершенствование обеспечения регулярных наземных геофизических наблюдений в Арктике. (FMES-2021-0007)

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Федоренко Ю.В.

Отв. исполнители: к.ф.-м.н. Сахаров Я.А., д.ф.-м.н. Сафаргалеев В.В., к.ф.-м.н. Косолапенко В.И., к.ф.-м.н. Лебедь О.М., Ларченко А.В., Пильгаев С.В., Ролдугин А.В. и др.

Исследования по теме «Пополнение баз данных и совершенствование обеспечения регулярных наземных геофизических наблюдений в Арктике» в 2021 году проводились в соответствии с основными направлениями Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) государственных академий наук на 2013–2020 гг., а именно п. 12. «Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений» в части «разработка новых методов генерации и приема излучения различной физической природы и спектральных диапазонов для диагностики окружающей среды, включая литосферу, атмосферу, ионосферу и магнитосферу, и активного воздействия на нее». Для обеспечения исследований процессов, формирующих космическую погоду и изучения гелиогеофизических связей в обсерваториях ПГИ продолжались регулярные наблюдения вариаций геомагнитного поля и КПК кратковременных вариаций электрического поля Земли, регистрация трех компонент поля КНЧ/ОНЧ излучений и телевизионные наблюдения полярных сияний. Продолжалась регистрация ГИТ на подстанциях «Карелэнерго» с размещением данных в базе института.

Восстановлены и исследованы особенности энергетических спектров высыпавшихся электронов $f(E)$, формирующих лучистые структуры в полярных сияниях. Показано, что в области энергий $E \sim 500 \div 1000$ эВ наблюдается локальный максимум, в то время как в области энергий $E \sim 250$ эВ - резкое возрастание с уменьшением энергии, близкое к степенной зависимости $E^{-\alpha}$. На основе анализа 8 событий подтверждено предположение о том, что полученные распределения $f(E)$ хорошо аппроксимируются суммой двух функций, носящих степенной характер на малых энергиях и максвелловское распределение по энергиям на энергиях > 250 эВ. Высказано предположение, что лучистые структуры в полярных сияниях формируются благодаря сбросу в ионосферу электронов, имеющих степенное распределение по энергиям. С использованием метода оптической томографии показано, что во время интервалов ВКЛЮЧЕНО высота пульсирующей с периодом несколько секунд авроральной дуги уменьшается, что может означать ускорение частиц, вызывающих свечение. Предложена интерпретация явления в рамках пульсирующего аномального сопротивления в области вытекающего из пульсирующей дуги продольного тока.

Прохождение аврорального хисса к земной поверхности возможна за счет рассеяния генерируемых волн на мелкомасштабных (десятки и сотни метров) неоднородностях электронной концентрации в верхней ионосфере. Возникновение неоднородностей есть результат взаимодействия магнитосферы и ионосферы с солнечным ветром, поэтому положение области в ионосфере, занятой неоднородностями, представляет особый интерес. В проведенном исследовании предпринята попытка локализовать эту область по данным наземных наблюдений и сформулировать основные особенности ее пространственной структуры и соответствующие им особенности поведения параметров поля у земной поверхности. По данным камер всего неба, МВС и приемника GPS для события 24.12.2014г. установлены параметры возмущения ионосферы для моделирования влияния авроральных высыпаний на зоны засветки односкачковыми лучевыми траекториями, выходящими из передатчиков КВ-диапазона на средних широтах.

Эксплуатировавшиеся ранее в обсерваториях ПГИ приемники СНЧ/ОНЧ сигналов имели автономные генераторы частоты дискретизации, не синхронизированные с мировым впеменем. С целью устранения этого недостатка была произведена модернизация трехкомпонентного СНЧ/ОНЧ приемника. Для устранения дрейфа частоты дискретизации АЦП из схемы исключен кварцевый резонатор, а в качестве опорного тактового сигнала используется стабилизированный по времени сигнал с выхода GPS/GLONASS-приемника.

Для облегчения целей исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций реализован интерактивный WEB-интерфейс, позволяющий просматривать в каждый заданный момент времени кадры оптической камеры с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующие индексы сцинтилляций. В настоящее время WEB-интерфейс функционирует в тестовом режиме. Производится накопление данных приборов, отладка и коррекция работы страницы.

Проведен анализ проявления флуктуаций навигационных сигналов в Арктике, обусловленных авроральным возмущением 27 сентября 2019 г. В этот период были выявлены аномально 3D ошибки позиционирования навигационных измерений на европейских авроральных станциях. Показано, что большие ошибки позиционирования обусловлены прохождением навигационных сигналов через интенсивные дискретные формы сияний.

1. Создание новой и модернизация существующей оптической аппаратуры для регистрации свечения ночного неба в арктических широтах.

Создан, испытан и введен в эксплуатацию макет поляризационной камеры. Прибор предназначен для измерения степени поляризации свечения неба в трёх широких спектральных каналах и представляет собой мультиспектральную камеру всего неба, оснащённую блоком поляризационных светофильтров.

Измерение поляризационных характеристик осуществляется последовательным автоматическим экспонированием неба через три поляризационных светофильтра, чьи оси имеют относительное смещение на 120 град., а применение в качестве фотоприёмника RGB матрицы обеспечивает трехканальное спектральное разделение.

Основные технические параметры прибора приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значение	Параметр
Поле зрения,	град 180
Формат кадра ,	пикс 680 x 680
угловое разрешение,	град 0.5
временное разрешение,	Гц 0.2
временная точность,	сек 0.05
рабочий спектральный диапазон ,	нм 400÷760
тип спектральной фильтрации	RGB
число поляризационных каналов	3
сдвиг осей поляризации,	град 120
порог чувствительности,	рэлей 100
разрядность АЦП,	бит 14
рабочий зенитный угол Солнца,	град -18 ÷ 0

На рис. 41.1, 41.2, 41.3, представлены изображения неба в поляризованном свете, полученные при тестировании прибора, на рис. 41.4 - изображения неба в естественном свете.

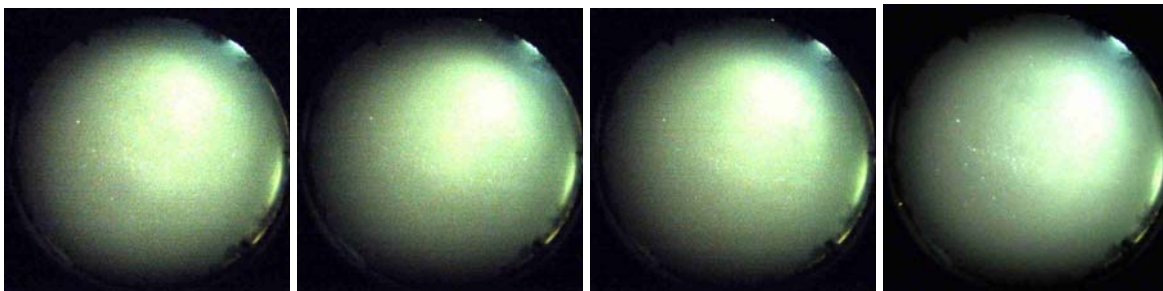


Рис. 41.1. фильтр «0°» **Рис. 41.2.** фильтр «120°» **Рис. 41.3.** фильтр «240°» **Рис. 41.4.** без фильтра

На рис. 42 приведён внешний вид прибора, установленного в obs. ПГИ «Ловозеро»



Рис. 42. Мультиспектральная поляризационная камера.

Прибор обеспечивает проведение стандартных оптических наблюдений в комплексе с иными оптическими приборами для авроральных исследований.

Выводы:

Создан прибор для оценки физических параметров среды в области мезосферы, испытывающих влияние от авроральных проявлений. Прибор обеспечивает проведение стандартных оптических наблюдений в комплексе с иными оптическими приборами для авроральных исследований.

2. Исследование высокоширотных проявлений космической погоды и их воздействия на технические системы.

Авроральный хисс — один из типов естественных электромагнитных излучений, регистрируемых на земной поверхности. Из-за особенностей генерации эти волны не способны выйти к Земле при спокойных условиях [1]. Волны испытывают полное внутреннее отражение в нижней ионосфере и в верхней ионосфере, где их частота становится равной локальной частоте ниже-гибридного резонанса [2]. Считается, что выход хисса к земной поверхности возможен за счет рассеяния генерируемых волн на мелкомасштабных (десятки и сотни метров) неоднородностях электронной концентрации в верхней ионосфере [1].

Возникновение неоднородностей есть результат взаимодействия магнитосферы и ионосферы с солнечным ветром, поэтому положение области в ионосфере, занятой неоднородностями, (далее область рассеяния) представляет особенный интерес для исследователей. В проведенном исследовании предпринята попытка локализовать эту область по данным наземных наблюдений и сформулировать основные особенности ее пространственной структуры и соответствующие им особенности поведения параметров поля у земной поверхности.

Классификация области рассеяния аврорального хисса

Используя данные, накопленные за период с 07 ноября 2018 года по 9 февраля 2020 года на станциях Каннуслахто (Финляндия) и обс. Ловозеро (Россия), проведена классификация области рассеяния аврорального хисса. Регистрация ведется с использованием идентичных приемников, способных измерять горизонтальные компоненты магнитного поля H_x H_y и вертикальную компоненту электрического поля E_z . Антенны приемников тщательно откалиброваны, что позволяет проводить сравнение результатов наблюдений на двух станциях.

В записях компонент поля предварительно подавлены атмосферика методом, использованным в работах [3, 4]. Отбор событий осуществлялся по спектрограммам горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля, построенным для часовых интервалов в диапазоне частот от 500 Гц до 14 кГц. Для каждого события записи компонент поля были подвергнуты фильтрации полосовым фильтром с центральной частотой 8 кГц и шириной полосы 1 кГц. Всего отобрано 22 события регистрации хисса, для которых на частоте 8 кГц отношение сигнал/шум на обеих станциях было не меньше 10 дБ. Анализировались огибающая горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля H_t , индекс круговой поляризации P_c , отношение вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного E_z/H_t и распределение плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга $p(\varphi)$ [3, 4].

Из отобранных событий выделено 4 типа пространственной структуры области рассеяния. Из 22-ух событий отмечено пять, для которых параметры H_t , P_c , E_z/H_t и $p(\varphi)$ имели схожую динамику, вызванную, на наш взгляд, существованием малой относительно расстояния между станциями области рассеяния. Ярким примером такого события является случай регистрации хисса 20 декабря 2018 года 19:17 — 19:37 UT (см. рис. 43а). Параметр H_t на одной из станций (в данном случае это LOZ) в 3 — 5 раз больше, чем на другой (KAN). На этой станции (LOZ) индекс P_c близок к 1, что означает регистрацию волн с правой, близкой к круговой, поляризацией. Также на ней отмечается уменьшение параметра E_z/H_t , вызванное большими углами падения регистрируемых волн, а также распределенная по всему диапазону обратного азимута (360°) плотность потока энергии (рис. 43а). Эти признаки означают расположение данной точки в окрестности центра области рассеяния. На соседней станции (KAN) индекс P_c меньше на 0,5 — 0,8, отношение E_z/H_t увеличивается, а максимум распределения $p(\varphi)$ указывает приблизительно на центр проекции области рассеяния. В этой точке наблюдается не только прямая волна, но и испытавшая отражения от стенок волновода Земля-ионосфера.

На рисунке 43б представлены параметры H_t , P_c , E_z/H_t и $p(\varphi)$ во время регистрации аврорального хисса на станциях KAN и LOZ 5 марта 2019 года 21:29 — 21:36 UT. Рассматриваемое событие является примером перемещения области рассеяния. На одной из станций (KAN) происходит увеличение параметра H_t и индекса P_c , а также уменьшение параметра E_z/H_t . Во время наблюдения максимума H_t и индекса P_c и минимума отношения E_z/H_t , наблюдается «широкое» распределение $p(\varphi)$. В это время область рассеяния находится

над точкой наблюдений. После этого параметры поля плавно возвращаются к исходному уровню. На другой станции (LOZ) происходят аналогичные изменения с некоторой временной задержкой. Во время возникновения всплеска (~ 21:31 UT) максимум распределения $p(\varphi)$ указывает на запад в направлении соседней станции (KAN). По мере увеличения мощности всплеска, индекса P_c и уменьшении отношения E_z/H_t распределение $p(\varphi)$ изменяется от «узкого» на «широкое». Вероятно, в это время область рассеяния смещается и становится над точкой LOZ. В 21:33 UT распределение $p(\varphi)$ «сужается», причем его максимум указывает на восток. Происходит смещение области рассеяния к востоку. В трех из 22-ух событий отмечено подобное поведение параметров поля.

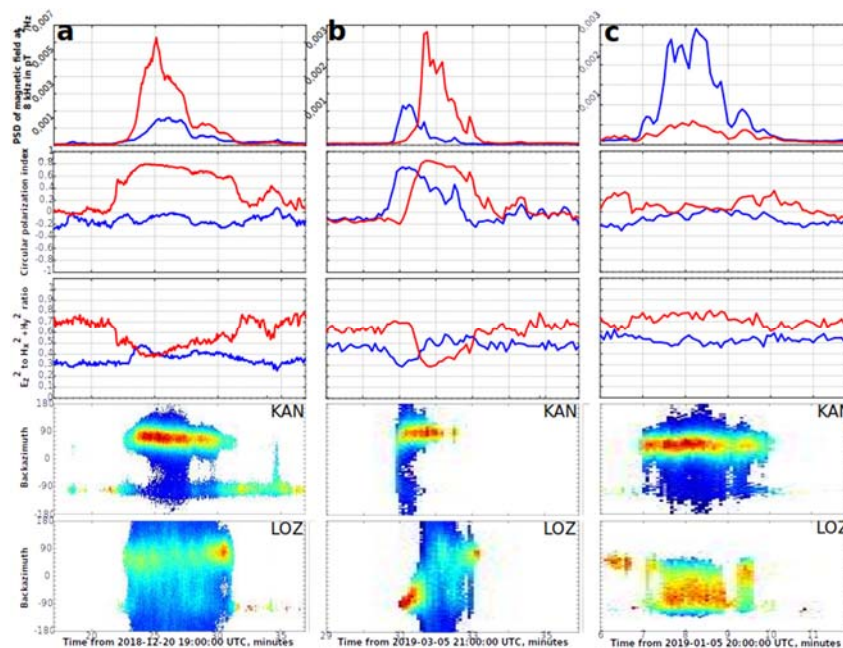


Рис. 43. (сверху вниз) огибающая горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля H_t , индекс круговой поляризации P_c , отношение вертикальной компоненты напряженности электрического поля к горизонтальной компоненте напряженности магнитного E_z/H_t , распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга $p(\varphi)$ на станциях KAN и LOZ для события регистрации аврорального хисса а) 20 декабря 2018 года 19:17 — 19:37 UT, б) 5 марта 2019 года в 21:29 — 21:36 UT, в) 5 января 2019 года в 20:06 — 20:12

Также наблюдаются случаи существования вытянутой по долготе области рассеяния. Всего отмечено шесть таких событий, одно из которых 5 января 2019 года в 20:06 — 20:12 UT представлено на рисунке 43с. В этом случае индекс P_c и отношение E_z/H_t принимают близкие значения на обеих станциях. Максимумы распределения $p(\varphi)$ указывают в направлении соседней станции. В рассматриваемом примере, по-видимому, центр симметрии области рассеивания несколько ближе к KAN, чем к LOZ. Этим можно объяснить различия мощности всплесков на обеих станциях.

Чаще всего (8 случаев из 22) в основном появляются несколько областей рассеяния различных размеров. В работе [3] рассмотрен пример такого события с интерпретацией данных наземных наблюдений посредством моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до наземного наблюдателя.

Выделено 4 типа пространственной структуры области рассеяния аврорального хисса и сформулированы отличительные особенности поведения поля излучений, соответствующие тому или иному типу. Полученные результаты упрощают анализ данных наземных

наблюдений аврорального хисса и позволяют проводить оценку положения области рассеяния. Полученные результаты опубликованы в работе [3].

Локализация области рассеяния

Представлены результаты оценки положения и размера области рассеяния на основе сопоставления результатов моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности и данных наземных наблюдений на станциях obs. Баренцбург, obs. Ловозеро и Каннуслехто, расположенных в авроральной области и полярных широтах. На примере события 03 февраля 2019 года 18:30 - 20:00 UT (см. рис. 44) рассмотрены случаи регистрации хисса только в obs. Баренцбург и на всех трех станциях одновременно. Предварительная обработка записей компонент поля аналогична представленной в предыдущем разделе.

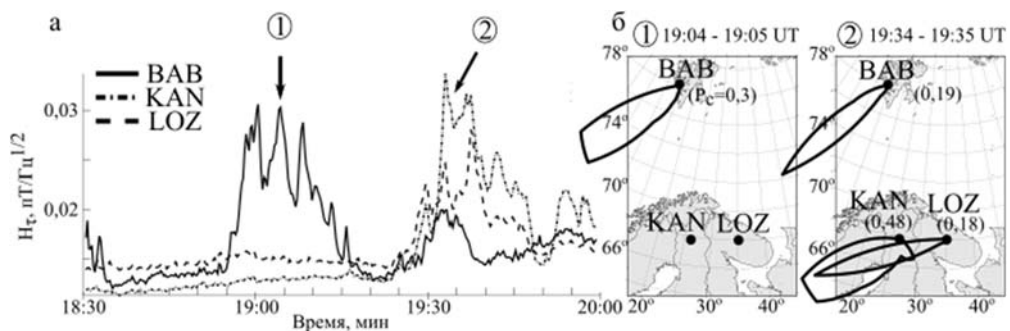


Рис. 44. а) Огибающие горизонтальной компоненты магнитного поля, полученные после фильтрации записей компонент H_x , H_y полосовым фильтром; obs. Баренцбург (сплошная линия), obs. Ловозеро (пунктирная линия) и Каннуслехто (штрих-пунктирная линия). Распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода $p(\varphi)$ вместе с усредненными индексами круговой поляризации P_c , рассчитанные для интервалов 19:04 - 19:05 UT (б) и 19:34 - 19:35 UT (в).

На рисунке 44а представлена огибающая горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля H_i на трех станциях для выбранного события. Из рисунка видно, что в 18:55 UT в BAB возникает всплеск, который отсутствует в KAN и LOZ, и длится до 19:17 UT. С 19:25 по 19:50 UT на станциях LOZ и KAN регистрируется последовательность всплесков хисса. Их возникновение сопровождается появлением в BAB всплеска длительностью около 10 минут. Рассчитаны распределения плотности потока энергии по обратному азимуту $p(\varphi)$ вместе с усредненными значениями индекса круговой поляризации P_c за интервалы 19:04 - 19:05 UT и 19:34 - 19:35 UT (рис. 44б, в).

Максимум распределения $p(\varphi)$ в BAB в интервал 1 указывает на юго-запад, а разброс по обратному азимуту составляет около 40 - 50 градусов. (рис. 44б). В данном случае пучок волн приходит в точку наблюдений преимущественно с юго-западного направления. Индекс круговой поляризации P_c принимает значение 0,3, что говорит о правой эллиптической, близкой к линейной, поляризации магнитного поля этих волн. Наблюдаемые малый разброс в углах и эллиптическая поляризация, вероятно, вызваны тем, что центр засвечиваемого на земной поверхности пятна расположен достаточно далеко от BAB. В интервал 2 максимум распределения $p(\varphi)$ в BAB (рис. 44в) указывает на юго-запад, причем разброс по углам на 10 - 15 градусов меньше, чем в интервал 1. Индекс P_c равен 0,19. Таким образом, в данную точку с юго-запада приходят практически линейно поляризованные волны. В KAN максимум распределения $p(\varphi)$ указывает на запад-юго-запад, а разброс по углам составляет около 50 - 60 градусов. Индекс P_c составляет 0,48, что говорит о правой эллиптической поляризации

магнитного поля. Распределение $p(\varphi)$ в LOZ имеет значительно меньший разброс по углам (около 20 - 30 градусов), а его максимум указывает также на запад-юго-запад. Поляризация магнитного поля при этом близка к линейной - индекс $P_c = 0,18$. По-видимому, центр засвечиваемого пятна расположен ближе к KAN. В данном случае наблюдаемые во всех трех точках распределения $p(\varphi)$, поляризация и интенсивность магнитного поля могут быть результатом существования в ионосфере как одной области рассеяния, протяженной по широте, так и нескольких локальных областей рассеяния.

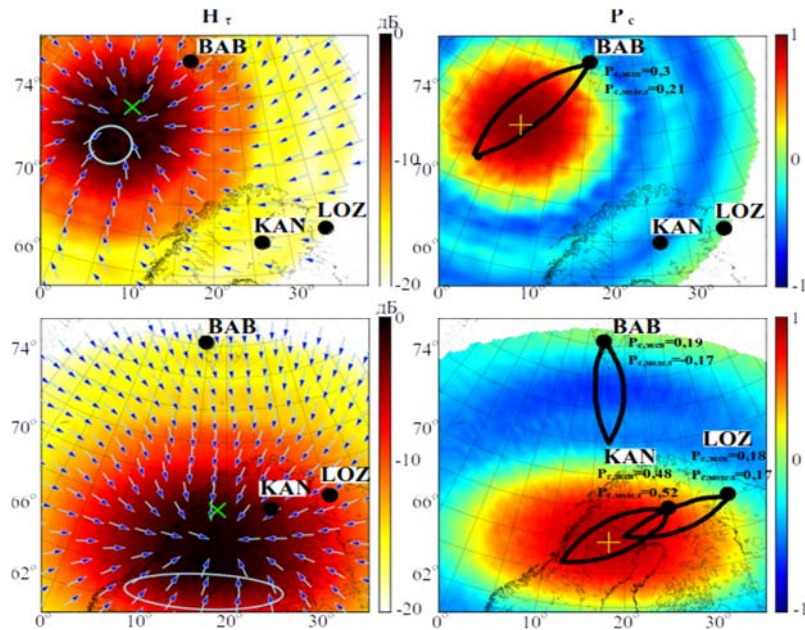


Рис. 45. Модельные распределения на земной поверхности мощности магнитного поля (рисунки слева) и индекса круговой поляризации магнитного поля P_c вместе с распределениями $p(\varphi)$ (рисунки справа), полученные для интервала 1 (а, б) и интервала 2 (в, г). Зеленым крестиком обозначена широта, на которой происходит генерация электростатических волн, желтый крестик показывает центр засвечиваемого на земной поверхности пятна, овал означает проекцию на земную поверхность уровня 0,1 гауссианы, описывающей форму области рассеяния; стрелками обозначено направление, обратное направлению вектора Пойнтинга в данной точке, полученное после усреднения компонент этого вектора.

Для объяснения результатов наблюдений и локализации области рассеяния, используя разработанную в ПГИ модель [3], проведено моделирование распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности. На рисунках 45 а и б представлены модельные распределения на земной поверхности мощности магнитного поля и индекса круговой поляризации магнитного поля при той конфигурации области рассеяния, при которой модельные распределение $p(\varphi)$ и усредненное значение индекса P_c соответствуют экспериментальным, полученным в BAB в интервал 1. В KAN и LOZ мощность магнитного поля на 15 - 17 децибел ниже, что, по-видимому, вызвано большим затуханием волн при распространении в волноводе Земля-ионосфера. В реальных условиях напряженность магнитного поля (рисунок 45 а) в этих точках будет меньше уровня шума волновода Земля-ионосфера.

Варьируя положение и размеры области рассеяния, не удалось подобрать такую конфигурацию, при которой были бы воспроизведены наблюдаемые на всех трех станциях в интервал 2 распределение $p(\varphi)$ и индекс P_c . Далее рассматривался сценарий, когда в этот интервал на станциях KAN и LOZ регистрируются поля, рассеянные на одной области с неоднородностями, а на станции BAB - рассеянные на другой области. Наблюдаемые в BAB

распределение $p(\varphi)$ и индекс P_c похожи наблюдаемым в интервал 1. Наблюдаемые на станциях KAN и LOZ распределение $p(\varphi)$ и индекс P_c в интервал 2 удалось воспроизвести при форме и размерах области, представленной на рисунках 45 в, г. В рассматриваемый момент времени южнее точек KAN и LOZ существовала вытянутая по долготе область рассеяния.

Выводы

Проведен анализ данных наземных наблюдений аврорального хисса с применением модели распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности. Показано, что в рассмотренных случаях область рассеяния электростатических волн в конус выхода к земной поверхности была локальна, а ее размеры по широте много меньше расстояния между станциями. Размеры области рассеяния по долготе были или меньше расстояния между станциями, или сравнимы с этим расстоянием. Анализ распределения потока энергии по углам позволил выявить случай, когда на разных широтах одновременно существовало две области рассеяния. Выделено 4 типа пространственной структуры области рассеяния аврорального хисса и сформулированы отличительные особенности поведения поля излучений, соответствующие тому или иному типу.

Список литературы:

1. *Sonwalkar V.S., Harikumar J.* An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 18.867–18.884. 2000. doi 10.1029/1999JA000302
2. *Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M.* Auroral hiss: a review // *Planet. Space Sci.* V. 41. P. 153–166. 1993. doi 10.1016/0032-0633(93)90045-4
3. Моделирование прохождения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности/ *О.М. Лебедь, Ю.В. Федоренко, Ю. Маннинен и др.*// *Геомагнетизм и аэронавигация.* — 2019. — Т.59, №5. — С. 618–627. doi 10.1134/S0016794019050079
4. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках/ *А.С. Никитенко, О.М. Лебедь, Ю.В. Федоренко и др.*// *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* — 2021. — Т.85, №3. — С.398–403. doi 10.31857/s0367676521030200
5. Ионосферная область рассеяния ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в высоких широтах / *А.С. Никитенко, М.В. Кузнецова, Ю.В. Федоренко, и др.* // *Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.* (в печати)

3. Разработка и совершенствование программного, аппаратного и методического обеспечения наблюдений на сети арктических станций в КНЧ/СНЧ/ОНЧ/НЧ диапазонах.

Произведена модернизация трехкомпонентного СНЧ/ОНЧ приемника. Для устранения дрейфа частоты дискретизации АЦП из схемы исключен кварцевый резонатор. В качестве опорного тактового сигнала используется стабилизированный по времени сигнал с выхода GPS/GLONASS-приемника. Блок схема модернизированного приемника приведена на рис. 46.

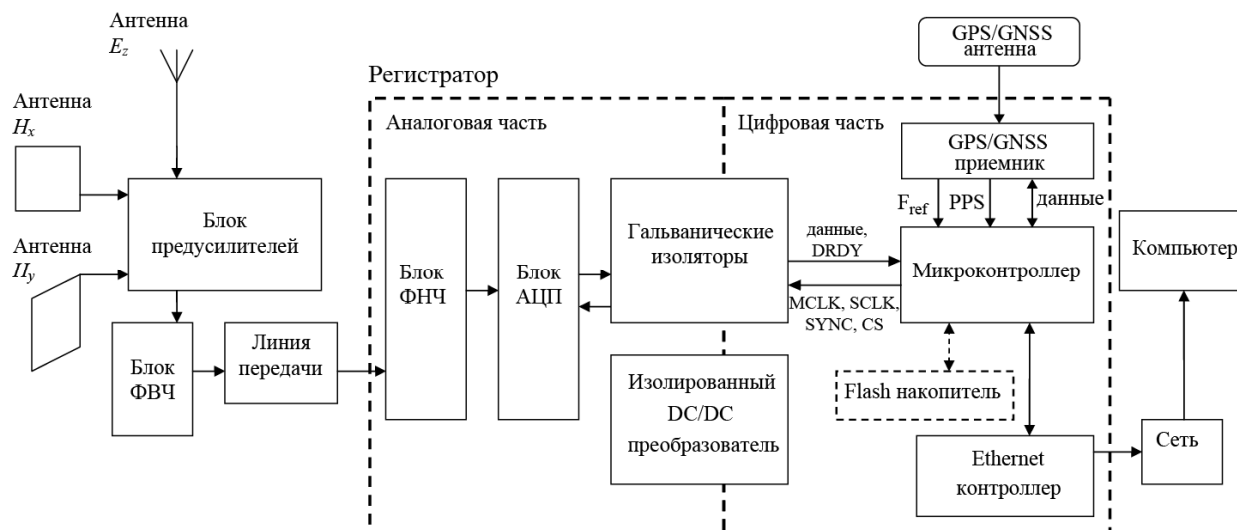


Рис. 46. Блок схема модернизированного трехкомпонентного СНЧ/ОНЧ приемника

Цифровая часть разработанного ОНЧ приемника работает под управлением микроконтроллера LPC1788. Микроконтроллер непосредственно управляет GPS/ГЛОНАСС-приемником, микросхемами а.ц.п. и Ethernet-интерфейсом для связи с компьютером. Для синхронизации времени используется GPS/ГЛОНАСС-приемник *lea-m8t* со встроенным резонатором (Temperature Compensated Crystal Oscillators) TCXO-типа. Он имеет стандартный выход PPS и программируемый выход сигнала тактовой частоты. Последний является источником опорной частоты для микроконтроллера. Модуль таймера микроконтроллера, используя делители, формирует меандр частотой 1024 кГц, который является номинальной опорной частотой для микросхем АЦП. Так достигается стабильность частоты дискретизации. Параллельная работа аналого-цифровых преобразователей от одного тактового источника обеспечивает точное временное соответствие отсчетов данных всех трех каналов.

Сформированные пакеты данных могут передаваться как через интерфейс Ethernet на компьютер, так и записываться на энергонезависимую память. Регистратор формирует из оцифрованных данных пакеты по 1024 байт, с указанием необходимой информации о процессе сбора в заголовке пакета. Заголовок содержит в себе значение частоты дискретизации, временную метку, координаты станции и статус GPS/ГЛОНАСС-приемника.

Выводы

С целью устранения дрейфа частоты дискретизации аналого-цифровых преобразователей произведена замена опорного источника тактовой частоты ОНЧ приемников в обсерваториях ПГИ. В результате модернизации исключена необходимость учета дрейфа частоты дискретизации при обработке данных, что позволило увеличить точность измерений и сократить время на анализ и верификацию данных.

4. Разработка рекомендаций по оценке погрешности позиционирования наземных объектов, обусловленной воздействием гелиогеофизических возмущений на спутниковые навигационные системы в Арктике.

В декабре 2020 года сотрудники Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова в здании Полярного геофизического института г. Апатиты ввели в эксплуатацию новый GNSS приемник Septentrio PolaRx5S. Среди возможностей данного приемника можно выделить автоматический расчет ПЭС, фазовых и амплитудных индексов сцинтилляций. Так же камеры всего неба Полярного геофизического института работают в месте установки приемника в г. Апатиты и в обс. Ловозеро. Для облегчения целей исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций реализован интерактивный WEB-интерфейс (рис. 47), позволяющий просматривать в каждый момент времени кадры оптических камер с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующими индексами сцинтилляций.

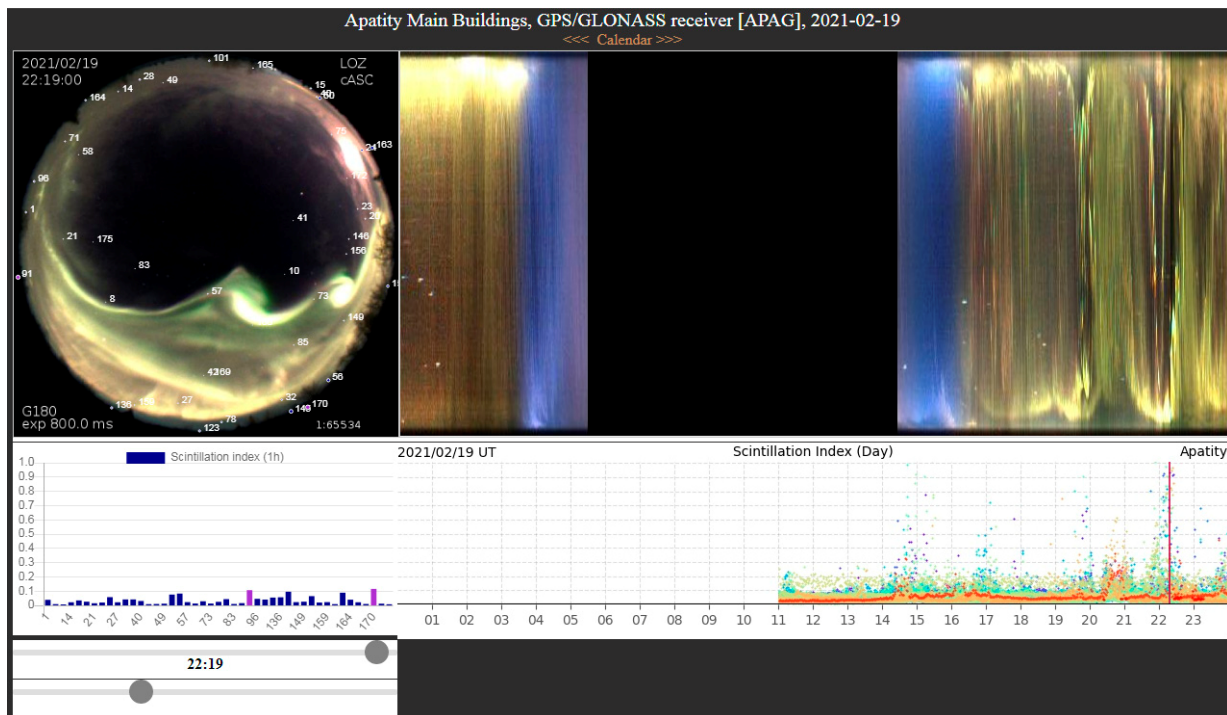


Рис. 47. Пример страницы событие 19 февраля 2021 с камерой всего неба в обс. Ловозеро.

Для облегчения целей исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций реализован интерактивный WEB-интерфейс, позволяющий просматривать в каждый заданный момент времени кадры оптической камеры с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующие индексы сцинтилляций. В настоящее время WEB-интерфейс функционирует в тестовом режиме. Производится накопление данных приборов, отладка и коррекция работы страницы.

Проведен анализ проявления флуктуаций навигационных сигналов в Арктике, обусловленных авроральным возмущением 27 сентября 2019 г. В этот период были выявлены anomalно 3D ошибки позиционирования навигационных измерений на европейских авроральных станциях. Показано, что большие ошибки позиционирования обусловлены прохождением навигационных сигналов через интенсивные дискретные формы сияний.

Во время возмущения 27 сентября 2019 г. TEC-флуктуации проявились после 17 UT в соответствии с временным развитием авроральной активности. Максимальная интенсивность флуктуаций регистрировалась на станциях TRO1 и KIRO и уменьшалась по направлению к экватору. Анализ 3D ошибок позиционирования выявил anomalно большие значения ошибок в окрестности 18 и 22 UT. В это время ошибки превышали 20 м и более, а в остальное время они варьировали в диапазоне 10-50 см. Особенностью anomalных ошибок явилась их

изолированность, а также кратковременный характер (2-5 мин.). Во временном поведении детальный анализ флуктуаций в окрестности 18 и 22 UT выявил наличие всплесков повышенной интенсивности длительностью 20-40 мин. Этот анализ проведен по станции KIR0, для которой имелись данные о полярных сияниях. В рассматриваемые периоды наблюдались интенсивные дискретные формы сияний. Сопоставление ошибок, флуктуаций и полярных сияний позволило сделать вывод, что аномально большие ошибки позиционирования обусловлены пересечением (прохождением) навигационных сигналов через дискретные формы сияний. Поэтому при навигации в Арктике следует учитывать, что в условиях сияний можно ожидать ухудшения навигационных измерений, а именно — существенного увеличения ошибок позиционирования. В отдельных случаях при высокой авроральной активности и в присутствии интенсивных различных форм сияний может оказаться невозможным определение координат потребителя.

Выводы

Для исследования связи полярных сияний и сцинтилляционных индексов, разработан WEB сайт с интерфейсом, позволяющим просматривать кадры камеры всего неба с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующие индексы сцинтилляций.

Проведенный анализ вариаций фазовых флуктуаций GNSS сигналов в Арктике, обусловленных авроральными возмущениями, показал, что аномально большие ошибки позиционирования обусловлены прохождением навигационных сигналов через дискретные формы сияний. При навигации в Арктике рекомендуется учитывать, что в условиях сияний можно ожидать ухудшения навигационных измерений, увеличения ошибок позиционирования и в отдельных случаях невозможности определения координат потребителя.

5. Исследование процессов, протекающих в области полярных сияний, инициированных электронными и протонными высыпаниями.

Ранее была создана методика восстановления спектральных характеристик электронных потоков, формирующих лучистые структуры полярных сияний, на основе триангуляционных наблюдений камерами с приемниками, регистрирующими излучение в широком диапазоне длин волн (380–580нм). Спектры высыпающихся электронов восстанавливаются из экспериментально полученных высотных профилей энерговыделения в конкретных случаях полярных сияний:

$$W(h) = \rho(h) \int_E \frac{E}{R(E)} \lambda(h, E) f(E) dE \quad (1),$$

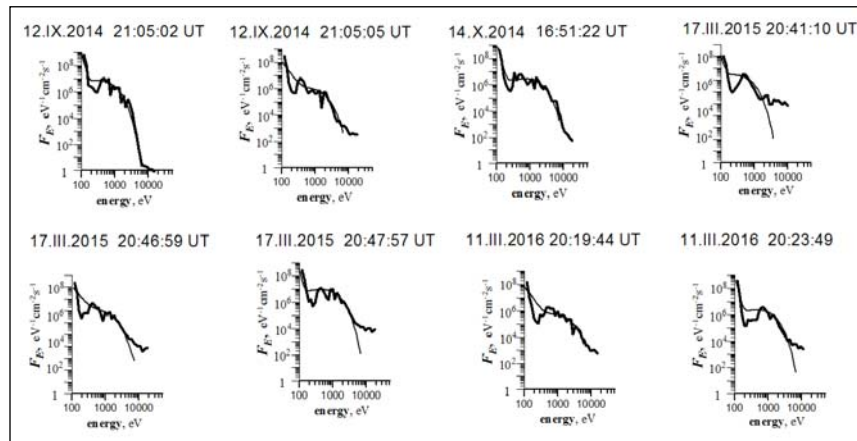
где: $W(h)$ - энергия, выделившаяся на высоте h в единицах; $\rho(h)$ - плотность атмосферы на высоте h в единицах; E - энергия электрона; $R(E)$ - интегральная длина пробега; $\lambda(h, E)$ – безразмерная функция диссипации энергии, описывающая долю энергии электрона, выделившейся на высоте h ; $f(E)$ - энергетический спектр высыпающихся электронов.

При апробации методики на 4 случаях лучистых форм полярных сияний было показано, что восстановленные энергетические спектры можно аппроксимировать суммой двух функций [1,2]:

$$F(E) = N_1 E^{-\alpha} + N_2 \exp(-E/E_0) / E_0^2, \quad (2).$$

По созданной ранее методике восстановлены энергетические спектры еще 8 случаев полярных сияний в виде лучистых дуг и полос. Восстановленные спектры представлены на

рис. 48. Из рисунка видно, что в поведении $f(E)$ наблюдаются две характерные особенности. В области энергий $E \approx 500 \approx 1000$ эВ наблюдается локальный максимум, в то время как в области энергий $E \approx 250$ эВ величина дифференциального потока электронов демонстрирует



резкое возрастание с уменьшением энергии близкое к степенной зависимости $E^{-\alpha}$.

Рис. 48. Восстановленные энергетические спектры $F(E)$ (толстая линия) и аппроксимация восстановленных энергетических спектров формулой (2) (тонкая линия).

Также были рассмотрены парциальные вклады в суммарное высотное энерговыделение $W(h)$ электронных потоков с разным видом распределения для энергии (см. формулу (2)). На рис. 49 приведены высотные профили энерговыделения для электронных потоков, имеющих степенной энергетический спектр и максвелловское распределение по энергиям. Из рисунка видно, что на высотах больше 250 км потоки электронов со степенным распределением по энергии формируют вертикальную протяженность профиля энерговыделения.

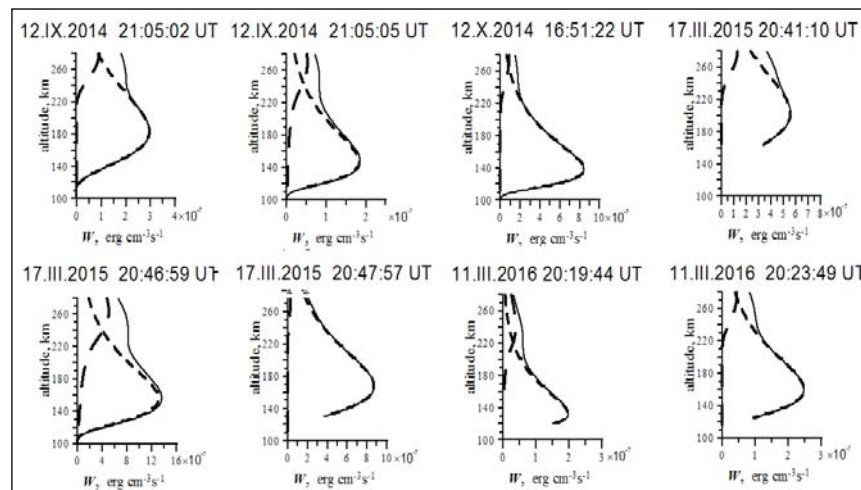


Рис. 49. Парциальные вклады в высотные профили энерговыделения $W(h)$ (сплошная линия) электронных потоков с максвелловским распределением по энергиям (короткий пунктир) и степенным распределением (длинный пунктир).

Выводы:

Обработаны экспериментальные данные 8 случаев лучистых форм полярных сияний (дуг и полос). Восстановлены энергетические спектры электронов, формирующие рассмотренные формы полярных сияний. Подтверждено предположение о том, что лучистые формы полярных сияний формируются суперпозицией потоков электронов, имеющих максвелловское и степенное распределением по энергиям.

Список литературы.

1. *Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.* Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объемной интенсивности свечения // *Космические исслед.*, т.59, с. 267-274, 2021, DOI: 10.31857/S0023420621040038
2. *Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В.* Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 2. Энергетические спектры высыпающихся электронов // *Космические исслед.*, т.59, с. 355-360, 2021, DOI: 10.31857/S0023420621050034

6. Продолжались наблюдения вариаций геомагнитного поля на obs. Ловозеро и Лопарская.

Обсерватория Ловозеро: регулярные наблюдения вариаций геомагнитного поля и КПК, кратковременных вариаций электрического поля Земли, телевизионные наблюдения полярных сияний.

Обсерватория Лопарская: регулярные наблюдения вариаций магнитного поля Земли.

Поддерживается доступ к обзорным данным через сеть интернет.

Исследование электромагнитного воздействия факторов космической погоды на технологические системы:

Продолжалась регистрация ГИТ на подстанциях «Карелэнерго». Работа выполняется с участием Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН (<http://www.en51.ru/>).

По данным наблюдений и архивных материалов для Северо-запада России будут определены зоны, наиболее подверженные низкочастотным электромагнитным помехам в периоды геомагнитных возмущений.

ТЕМА: Исследование вариаций химического состава, электрических явлений, неоднородной пространственной структуры и динамических процессов в атмосферах Земли и других планетных тел (FMES-2021-0010).

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А.С. Кириллов, д.ф.-м.н. И.В. Мингалев

Ответственные исполнители: к.ф.-м.н. Ю.Н. Куликов, В.И. Демин, д.ф.-м.н. И.В.

Мингалев.

Исполнители: к.ф.-м.н. К.Г. Орлов, м.н.с. Е.А. Федотова, м.н.с. З.В. Суворова, м.н.с. П.В. Сецко

Исследования по теме "Исследование вариаций химического состава, электрических явлений, неоднородной пространственной структуры и динамических процессов в атмосферах Земли и других планетных тел" проводятся как продолжение Программы ФНИ государственных академий наук на 2013-2020 годы – п. 16. Современные проблемы астрономии, астрофизики и исследования космического пространства, в том числе происхождение, строение и эволюция Вселенной, природа темной материи и темной энергии, исследование Луны и планет, Солнца и солнечно-земных связей, исследование экзопланет и поиски внеземных цивилизаций, развитие методов и аппаратуры внеатмосферной астрономии и исследований космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач.

Работа по теме "Исследование вариаций химического состава, электрических явлений, неоднородной пространственной структуры и динамических процессов в атмосферах Земли и других планетных тел" начала проводиться с 2021 г.

1. Математическое моделирование нестационарного процесса формирования полярных циклонов в арктической атмосфере Земли.

Проведено обобщение и анализ результатов численных расчетов, направленных на моделирование нестационарного процесса формирования полярных циклонов на начальной стадии в тропосфере в окрестности арктического фронта. Анализируемые результаты были получены при помощи региональной математической модели ветровой системы нижней атмосферы Земли, разработанной ранее в ПГИ.

Применяемая математическая модель позволяет рассчитывать зависящие от времени пространственно трехмерные распределения плотностей воздуха, водяного пара, микрокапель воды и частиц льда, зональной, меридиональной и вертикальной компонент скорости смеси воздуха и водяного пара, а также температуры атмосферного газа в области моделирования на отрезках времени порядка суток и более. В модели используются географические координаты, и для численного решения моделирующих уравнений применяется метод конечных разностей, при этом шаги расчетной сетки по высоте равны 200 м, а по широте и долготе шаги сетки одинаковы и равны 0.04 градуса. Модель является негидростатической. В используемой математической модели областью моделирования является часть шарового слоя над ограниченным участком земной поверхности, которая по высоте простирается от 0 до 15 км, по долготе имеет протяжение не менее 32 градусов, а по широте - 25 градусов.

Полученные результаты математического моделирования показывают, что возникновение выпуклостей в очертаниях арктического фронта, направленных как в северную, так и в южную стороны, может с течением времени привести к разрушению арктического фронта и формированию на его месте полярного циклона. Эти процессы могут сопровождаться зарождением двух значительно меньших по размерам антициклонических

вихрей. Горизонтальный поперечный размер возникшего полярного циклона может достигать до 800 км, а максимальная скорость ветра в нем может достигать 18 м/с. С течением времени образовавшийся полярный циклон может перемещаться в горизонтальном направлении, причем скорость и направление его перемещения оказываются разными и зависящими от того, в какую сторону было отклонение начальной выпуклости арктического фронта (к северу или к югу).

Физической причиной возникновения полярного циклона является развитие неустойчивости, инициированной искривлением арктического фронта. При этом кинетическая энергия первоначального крупномасштабного сдвигового течения в области арктического фронта переходит в кинетическую энергию полярного циклона.

2. Исследование кинетики электронно-возбуждённого молекулярного азота на высотах атмосферы Титана.

Проведено исследование кинетики триплетных состояний N_2 на высотах верхней и средней атмосферы Титана во время выпадания в атмосферу высокоэнергичных электронов из магнитосферы Сатурна и космических лучей. Профили скоростей ионообразования в верхней и средней атмосфере Титана взяты согласно литературным данным.

Впервые при расчете концентраций метастабильного молекулярного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ учтены столкновительные молекулярные процессы с атмосферными составляющими N_2 , CH_4 , CO . Сравнение относительных концентраций $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-20)/N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0)$ для высот верхней и средней атмосферы показывает, что неупругие молекулярные столкновения приводят к аккумуляции энергии электронного возбуждения метастабильного азота преимущественно на нижнем колебательном уровне $v=0$ на высотах средней атмосферы (рис. 50). Взаимодействие возбужденного азота с другими составляющими атмосферы может сказаться на процессах образования химически активных радикалов, что, однако, никогда ранее не учитывалось в химических моделях атмосферы Титана. Этот возбуждённый азот $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ может активно участвовать в процессах образования многоатомных радикалов, обнаруженных в атмосфере Титана.

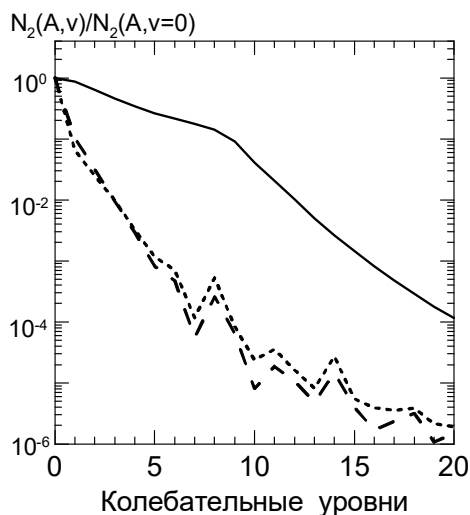


Рис. 50. Рассчитанные относительные концентрации метастабильного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-20)/N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0)$ на высотах 100 (короткие штрихи), 400 (длинные штрихи) и 1000 км (сплошная линия).

3. Исследование процессов вертикального массопереноса и химических реакций образования и разрушения озона на высотах 50-120 км в атмосфере Земли.

Исследование проведено путём сравнения результатов ракетных и спутниковых измерений высотных профилей ночной концентрации озона оптическими методами с результатами теоретических расчётов, выполненными на основе ранее разработанных в ПГИ аэрономических моделей верхней атмосферы Земли. Указанные измерения озона включают в себя ночные ракетные измерения интенсивности ИК-излучения озона в колебательно-вращательной полосе 9.6 мкм и ночные измерения поглощения атмосферным озоном УФ-излучения ярких звёзд на лимбе Земли спектрофотометром GOMOS с борта европейского спутника ENVISAT.

На рис. 51 представлены результаты модельных расчётов высотных профилей ночной концентрации озона для рассмотренных случаев 5, 6 и 8 в сравнении с профилем концентрации озона, полученным для средней широты 45°N путём осреднения данных измерений спектрофотометром GOMOS. Расчёт для случая 8 соответствует аппроксимации данных ракетных измерений концентрации озона в ночной полярной верхней атмосфере.

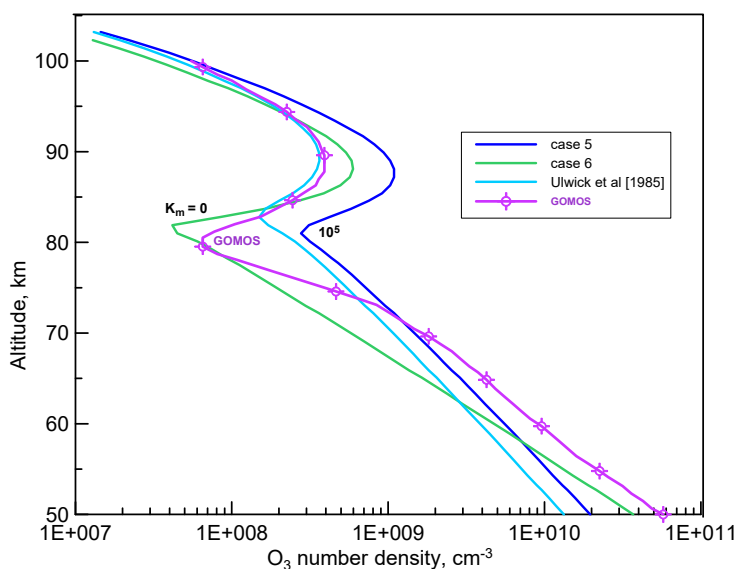


Рис. 51. Сравнение модельных высотных профилей концентрации озона с ночными ракетными измерениями (голубая кривая) и спутниковыми измерениями спектрофотометра GOMOS.

Сравнение данных спутниковых измерений инструмента GOMOS на средних широтах с результатами ракетных измерений ночной эмиссии озона в ИК-полосе 9.6 мкм в высоких широтах показало, что ракетные и спутниковые ночные измерения озона хорошо согласуются друг с другом в области мезопаузы и нижней термосферы от ~80 до 100 км, хотя и выполнены на разных широтах. Выполнено сравнение результатов моделирования высотного распределения концентрации озона в ночной мезосфере и нижней термосфере Земли с данными ночных спектрофотометрических измерений концентрации озона на средних широтах инструментом GOMOS с борта спутника ENVISAT. Сравнение показало, что ночная аэрономическая модель озона удовлетворительно аппроксимирует эти измерения в области мезопаузы и нижней термосферы от ~78 до 100 км.

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что на указанных высотах данные ракетных и спутниковых измерений концентрации озона могут быть использованы для надёжной оценки ключевых параметров ночной аэрономической модели, включая среднее максимальное значение коэффициента турбулентной диффузии в области мезопаузы K_m и

нисходящие потоки и высотные профили концентраций атомарного кислорода O, водорода H и озона. Однако расчёты также показали, что в ночной мезосфере на высотах от 50 до 75 км концентрации озона, рассчитанные из «ночной» аэрономической модели, существенно отличаются от данных измерений GOMOS. Таким образом, проведенное исследование указывает на необходимость разработки модели суточных вариаций озона в мезосфере с учетом дневных фотопроцессов для устранения обнаруженных недостатков «ночной» аэрономической модели.

4. Анализ и перспективы развития математических моделей глобальной циркуляции атмосферы Земли.

Проведен анализ достижений в создании математических моделей общей циркуляции атмосферы Земли и перспективных направлений развития таких моделей, которые развиваются уже более 50 лет как в нашей стране, так и за рубежом.

В атмосфере Земли протекают различные взаимосвязанные физические процессы. Происходит поглощение и рассеяние атмосферным газом солнечного излучения в диапазонах УФ, видимом и ближнем ИК, а также испускание, поглощение и рассеяние собственного излучения и излучения поверхности Земли в дальнем и среднем ИК диапазонах. Постоянно происходит образование облаков, их испарение и движение, а также выпадение осадков. Динамика облаков сильно влияет на нагрев-охлаждение атмосферного газа за счет поглощения и испускания излучения. Еще один важный процесс - это фотохимические и химические процессы, в частности, образование и разрушение озона. Концентрация озона сильно влияет на скорость нагрева атмосферного газа солнечным излучением в средней атмосфере. Еще один процесс - это движение атмосферного газа, обусловленное полем давления и ускорением внешних массовых сил. На поле давления большое влияние оказывает неравномерный нагрев атмосферного газа излучением. Движение же сильно влияет на распределение облаков и концентрации озона и тем самым на скорость нагрева атмосферного газа излучением. Существенную роль играют взаимодействие атмосферного газа с поверхностью Земли и приповерхностный пограничный слой.

По предназначению модели общей циркуляции атмосферы Земли можно разделить на три группы. В первую группу входят модели, предназначенные для прогноза погоды. В этих моделях область моделирования простирается от поверхности Земли до высот 25–30 км. Во вторую группу входят модели, предназначенные для моделирования изменений климата. В этих моделях область моделирования обычно простирается от поверхности Земли до высот 40–60 км. В третью группу входят модели, предназначенные для исследования протекающих в атмосфере Земли физических процессов и влияния этих процессов на общую циркуляцию атмосферы. К этой группе относится и разрабатываемая исполнителями настоящей темы модель общей циркуляции нижней, средней и верхней атмосферы Земли. Этими исполнителями сделан обзор современных моделей, используемых основными прогностическими центрами, а также обсуждены перспективные направления развития моделей общей циркуляции атмосферы Земли.

5. Анализ пространственного распределения температуры в пограничном слое атмосферы над территорией Мурманской области по данным микроволновых измерений и данных станций аэрологического радиозондирования.

По данным параллельных измерений вариации температуры воздуха в пограничном слое атмосферы (ПСА) над Мурманском, Апатитами и Кандалакшей происходят в значительной

степени синхронно. Однако в термической структуре ПСА обнаруживаются пространственные различия, вызванные большими расстояниями между пунктами измерений и неодинаковым воздействием Баренцева и Белого моря на тепловой режим прибрежных территорий. Зимой температура воздуха в ПСА над Мурманском выше, чем над Кандалакшей (рис. 52). Это обусловлено воздействием теплых течений незамерзающего Баренцева моря – более сильным, чем обогревающее влияние Белого моря. Наибольшие термические различия между Мурманском и Кандалакшей проявляется не в нижних слоях ПСА (здесь поступающие морские воздушные массы охлаждаются при контакте с выхолаженной поверхностью суши), а на высотах 400-800 м. Выше обогревающее влияние Баренцева моря заметно снижается и уже к 2 км температуры над Мурманском и Кандалакшей близки. Летом температура воздуха на высотах уменьшается с юга на север и ее значения над Мурманском ниже, чем над Кандалакшей. Наибольшая разность наблюдается снова не у поверхности, а на некоторой высоте. Это указывает на охлаждающее воздействие Белого моря – без этого влияния термический контраст между северным и южным побережьем был бы сильнее у поверхности. Весной и осенью влияние морей на тепловой режим прилегающих слоев атмосферы становится слабее, и контрасты температуры между побережьями сглаживаются.

По измерениям зимой 2020-21 гг. температура над Апатитами оказалась ниже, чем над Мурманском и Кандалакшей. Формирующаяся в центре Кольского п-ова небольшая область пониженных температур, обнаруживаемая в приземном слое по климатическим картам, по всей видимости, распространяется и на ПСА. В летний период температура воздуха по линии Мурманск-Апатиты-Кандалакша на высотах повышается с севера на юг: над Апатитами температура ниже, чем над Кандалакшей и выше, чем над Мурманском. Средние неоднородности поля температуры в ПСА составляют 1°C зимой и 2°C летом. В холмистом рельефе влияние микроклимата на распределения минимальной температуры могут перекрывать обычные широтные и вертикальные градиенты до относительных высот 100-200 м. Здесь в пределах первых десятков метров от поверхности могут возникать неоднородности, достигающие $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$. Данные микроволновых измерений в Апатитах были сопоставлены с измерениями температуры воздуха в Хибинах. Зимой периодические суточные вариации практически отсутствуют. Температура воздуха над горами ниже, чем воздуха над равниной на той же высоте: в среднем на 0.3°C в нижнем ярусе гор (400 м н.у.м.) и на 1.5°C на уровне наиболее высоких плато. Эффект создается адиабатическим охлаждением при его вынужденном подъеме при натекании на склоны.

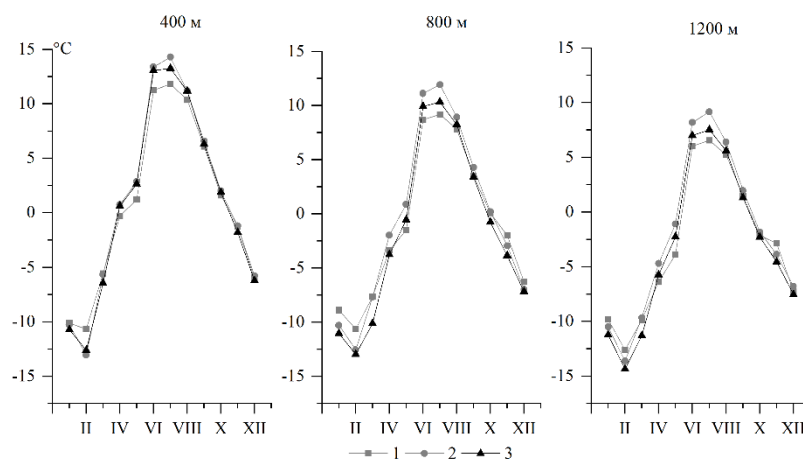


Рис. 52. Годовой ход среднемесячных температур воздуха на разных высотах над Мурманском (1), Кандалакшей (2) и Апатитами (3), 2020-2021 гг.

6. Исследование воздействия ионосферных возмущений на сигналы GPS и ГЛОНАСС спутников.

Проведено сравнение воздействия ионосферных возмущений на сигналы GPS и ГЛОНАСС спутников по данным ГНСС приемника Septentrio в Апатитах для крупнейшей за последние три с лишним года магнитной бури 3-5 ноября 2021 года ($SYM-H = -120$ нТл) (рис. 53).

Показано, что ионосферные возмущения приводят к заметному росту фазового индекса сцинтилляций ($\sigma\Phi > 1$ радиана), определенного по данным GPS и ГЛОНАСС спутников, не только в ночном, но и в дневном секторе. Различия в значениях фазового индекса сцинтилляций для GPS и ГЛОНАСС спутников могут быть связаны с различным наклоном орбит спутников и прохождением сигналов через различные ионосферные возмущения. Не наблюдается возмущений амплитудного индекса сцинтилляций, определенного по данным GPS и ГЛОНАСС спутников, во время данных возмущений.

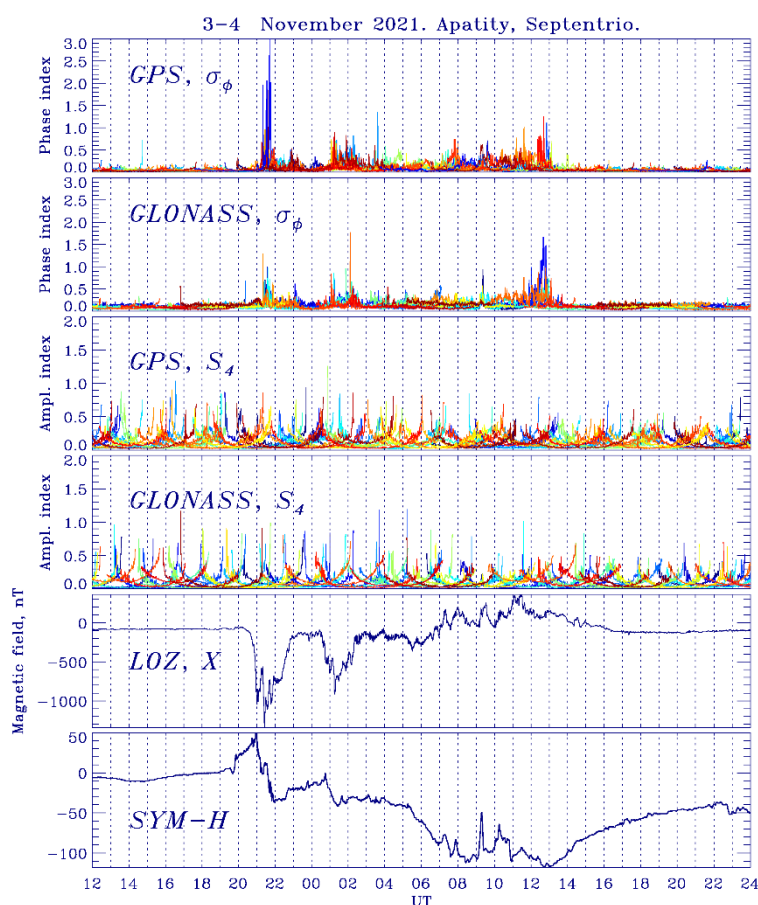


Рис. 53. Фазовый индекс сцинтилляций по данным GPS и ГЛОНАСС спутников, амплитудный индекс сцинтилляций по данным GPS и ГЛОНАСС спутников, вариации X-компоненты геомагнитного поля по данным станции Ловозеро, SYM-H индекс для 3-4 ноября 2021 года.

7. Численное моделирование распространения КВ в северо-западном регионе страны при использовании различных эмпирических моделей ионосферы.

В Полярном геофизическом институте некоторое время назад была разработана математическая модель, позволяющая вычислять лучевые траектории коротких радиоволн и поглощение энергии этих волн на лучевых траекториях. В этой модели используется приближение геометрической оптики, то есть считается, что длина волны намного меньше характерного масштаба изменения параметров среды, и волна считается квазиплоской. В

модели учитывается влияние земного магнитного поля на распространение радиоволны и отклоняющее поглощение за счет столкновений электронов. Модель позволяет рассчитывать траектории как обыкновенной, так и необыкновенной волн, а также поглощение энергии вдоль траекторий. Концентрация электронов и частота их столкновений с нейтралами рассчитываются с использованием эмпирических моделей ионосферы и нейтральной атмосферы.

Исполнителями настоящей темы в отчетном году при помощи численных расчетов по описанной модели исследованы отличия прогнозов условий КВ-радиосвязи между передатчиком, расположенным на средних широтах, и приемниками, расположенными в районах Норвежского и Баренцева морей, при использовании различных эмпирических моделей ионосферы. В качестве основы расчета прогнозов были использованы модели ионосферы IRI-2016 и Global Dynamic Model of Ionosphere (GDMI), разработанная в ИЗМИРАН. Показано, что прогноз условий радиосвязи, рассчитанный при помощи модели GDMI, может существенно отличаться от прогноза, рассчитанного при помощи модели IRI-2016. Также показано, что в середине декабря рассчитанные с помощью моделей GDMI и IRI-2016 значения МПЧ для радиотрассы Санкт-Петербург–Longyearbyen (Лонгйирбюен) (Шпицберген) для однокачковых траекторий днем превышают экспериментальные значения МПЧ на 5–20%, а ночью ниже экспериментальных на 30–40%. При этом для второй половины дня точность прогноза МПЧ, полученного с использованием модели GDMI, лучше, чем точность прогноза МПЧ, полученного с использованием модели IRI-2016. Для остального времени суток наоборот, использование модели IRI-2016 обеспечивает лучшую точность прогноза МПЧ.

8. Исследование экспериментальных данных характеристик поля атмосфериков.

Продолжается обработка экспериментальных данных спектров атмосфериков (начиная с 2014 г. по настоящее время), полученных при помощи последовательного анализатора спектров поля атмосфериков в обсерваториях Ловозеро (67.97°N, 35.02°E) и Баренцбурга (78.08°N, 14.22°E). Были использованы архивные данные X-Ray Flux геостационарного спутника GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Для исследования была выбрана вспышка на Солнце (20.11.2020 г.), состоящая из трех импульсов мощности класса В и С [https://www.polarlicht-vorhersage.de/goes/2020-11-20_000000_2020-11-23_000000.png].

Проведено исследование экспериментальных данных характеристик поля атмосфериков, зарегистрированных на авроральной обсерватории ПГИ Ловозеро (Мурманская обл.) (67.97°N, 35.02°E) во время солнечной вспышки по X-Ray Flux данным спутника GOES. Приведены амплитудно-временные вариации спектральных составляющих электромагнитного поля атмосфериков при вспышке на Солнце мощности класса В,С (20.11.2020 г.). Приведены оценки временных задержек между вспышкой на Солнце и реакцией нижней ионосферы Земли.

На временной оси АЧХ поля атмосфериков (рис. 54) выделены два участка с эффектом внезапного усиления атмосфериков SEA1,2 (sudden enhancement of atmospherics):

SEA1 - (19-00/20.11.2020 – 05-00/21.11.2020);

SEA2 - (07-00/21.11.2020 – 21-00/21.11.2020).

Факт совпадения периода импульсов солнечной вспышки и периода вариаций амплитуды спектральных составляющих поля атмосфериков в указанных на графиках полосе частот [(0.9–3.6 кГц и [(2.4–3.6) кГц] подтверждает соответствие указанных эффектов SEA1,2

к рассматриваемой вспышке на Солнце. Представленные экспериментальные результаты эффектов SEA1,2 позволяют оценить:

- а) временные задержки между вспышкой на Солнце и реакцией нижней ионосферы Земли;
- б) частотный диапазон амплитудных вариаций спектральных составляющих поля атмосфериков, который позволяет определить характерные энергии частиц, вызвавших ионизацию D-слоя ионосферы;
- в) степень корреляции вариации магнитного поля Земли и АЧХ поля атмосфериков, которая дает дополнительную информацию при изучении солнечно-земных связей;
- г) возможные изменения условий радиосвязи в полосе частот ОНЧ-диапазона.

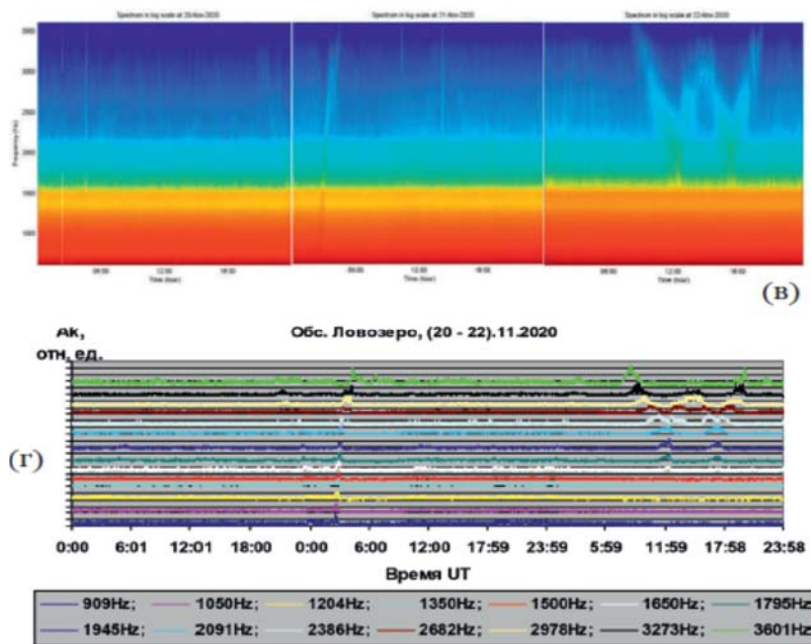
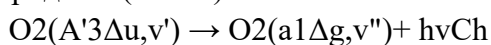


Рис. 54. Сонограмма с АЧХ поля атмосфериков (20.11.2020).

9. Анализ интенсивностей свечения полос Чемберлена молекулярного кислорода в атмосфере Земли в ночное время.

Выполнено сравнение расчётов интегральных интенсивностей свечения полос Чемберлена молекулярного кислорода с экспериментальными данными, полученными с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) и со спектрографа “EbertFastie” (национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона). Показано, что наилучшее согласие результатов расчётов с экспериментальными данными наблюдается при коррекции квантовых выходов колебательных уровней $A^3\Delta u$ состояния молекулярного кислорода при тройных столкновениях, которые были опубликованы ранее в научной литературе.

Получены значения интегральной светимости полос Чемберлена, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней $v'=3-6$ электронно-возбуждённого кислорода $O_2(A^3\Delta u)$



для условий низкой ($F_{10.7}=75$, 1976 и 1986 г.г.) солнечной активности для средних широт. Проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости полос Чемберлена в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 370-440 нм спектрографом с космического корабля “Дискавери” (STS 53) (рис. 55) и в обсерватории КИИТ-ПИК, Аризона в условиях низкой солнечной активности. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями

интенсивностей полос показало, что лучшее согласие наблюдается после коррекции квантовых выходов колебательных уровней qv' состояния $A^3\Delta_i$ в результате тройных столкновений $O + O + M \rightarrow O_2^* + M$, которые были получены и опубликованы в научной аппаратуре.

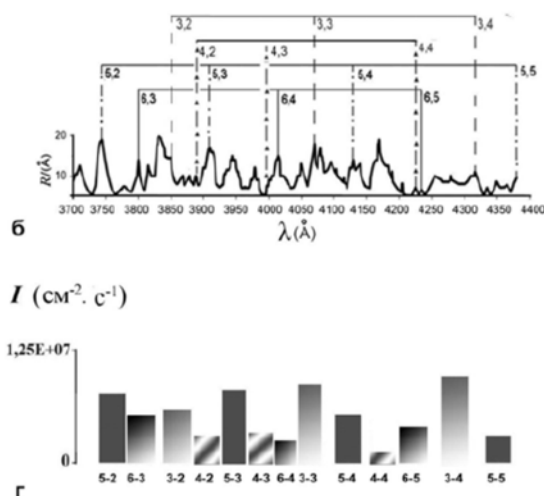


Рис. 55. Фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 370-440 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла (сверху); рассчитанные значения интегральной светимости для различных полос Чемберлена (внизу).

10. Исследование изменений концентраций озона в средней атмосфере, полученных с использованием метода наземной микроволновой радиометрии (совместно с ИПФ, Нижний Новгород).

Микроволновые измерения озона средней атмосферы в Апатитах проводились для трех зимних сезонов 2017 - 2018, 2018 - 2019 и 2019 - 2020 годов. При измерении содержания O_3 в средней атмосфере использовался метод микроволновой радиометрии. Оценка $[O_3]$ проводилась по частоте 110836.04 МГц. Озонметр располагался в здании АО Полярного геофизического института. По измеренным спектрам оценивались вертикальные профили озона в слое 22-60 км, которые сравнивались со спутниковыми данными MLS/Aura. Анализ микроволновых данных о поведении полярного мезосферного озона в прошлые зимы показывает, что внезапное стратосферное потепление (ВСП) может оказывать значительное и длительное влияние на его суточные колебания, которые должны определяться фотохимическими процессами.

На рис. 56 показаны вариации озона на высотах 25, 40 и 60 км (три зимы). Внезапные стратосферные потепления (ВСП) регистрировались для каждого зимнего сезона. Среднесуточные вертикальные профили концентрации озона на выбранных высотах 25, 40 и 60 км за три зимы - 2017-2018, 2018-2019 и 2019-2020 годов были получены и по наземным микроволновым наблюдениям в полярных широтах. Эти данные помечены жирными крестиками. Для высоты 60 км показано суточное изменение концентрации O_3 , связанное с восходом и заходом солнца. Ночные и дневные концентрации O_3 обозначены жирным и полупрозрачным крестиками соответственно. Сплошными линиями показаны бортовые данные (MLS/Aura) во время полета над Апатитами.

Обращают на себя внимание систематические различия в поведении данных для мезосферного озона (60 км) по наземным и бортовым измерениям (верхняя часть рис. 56). Следует отметить, что бортовые измерения достоверно фиксируют суточный ход мезосферного озона. Данные по концентрации озона были получены для ночных полетов

(жирная сплошная линия) и дневных полетов (полупрозрачная сплошная линия) над Апатитами. Наземные измерения ОЗ с временным разрешением 15 минут показали сильное и долгосрочное влияние ВСП на мезосферный озон. Возможное последствие стратосферного потепления - кратковременные (несколько дней) всплески ОЗ на высоте 60 км. Особенно они заметны для зим 2017-2018 и 2018-2019 годов

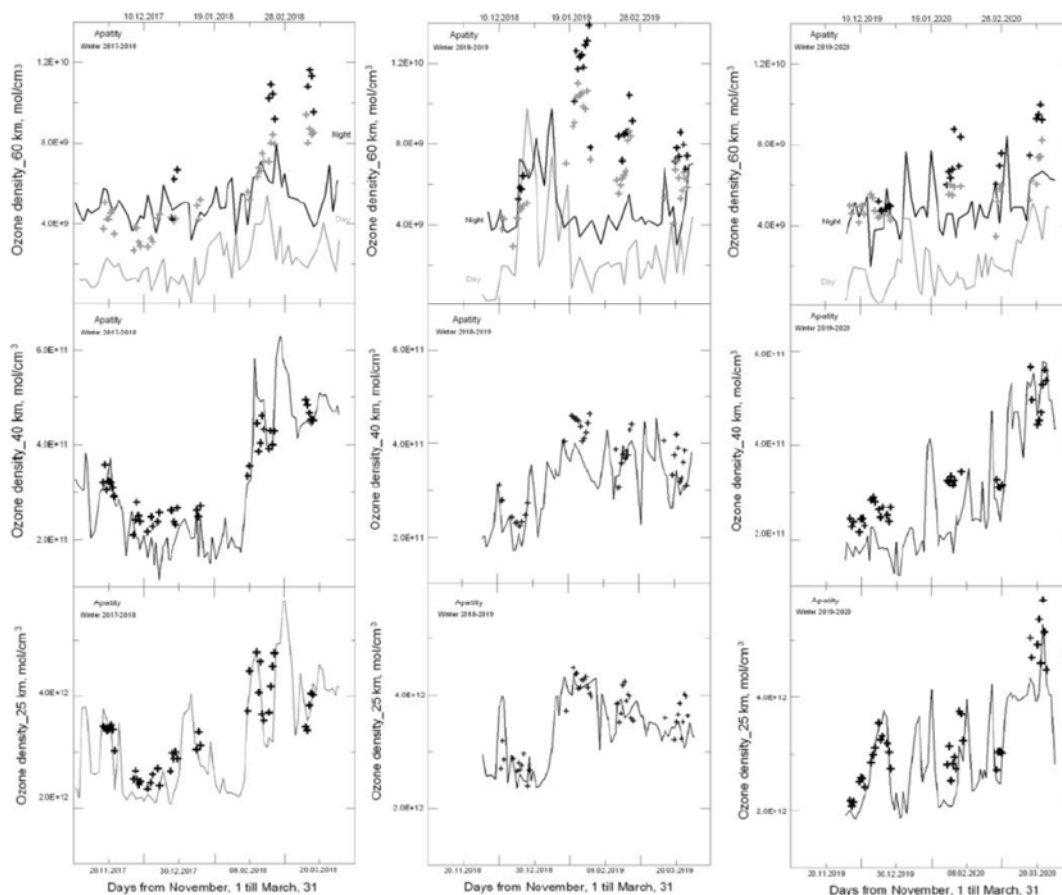


Рис. 56. Концентрации озона на высотах 25, 40 и 60 км за три зимы. Наземные микроволновые измерения (крестики); спутниковые измерения миллиметрового диапазона MLS/Aura (сплошные линии).

11. Измерения приземной концентрации озона и вертикального распределения температуры воздуха в городе Апатиты.

С помощью озонметра «DASIBI 1008АН» в 2021 г. в г. Апатиты продолжались измерения приземной концентрация озона (рис. 57).

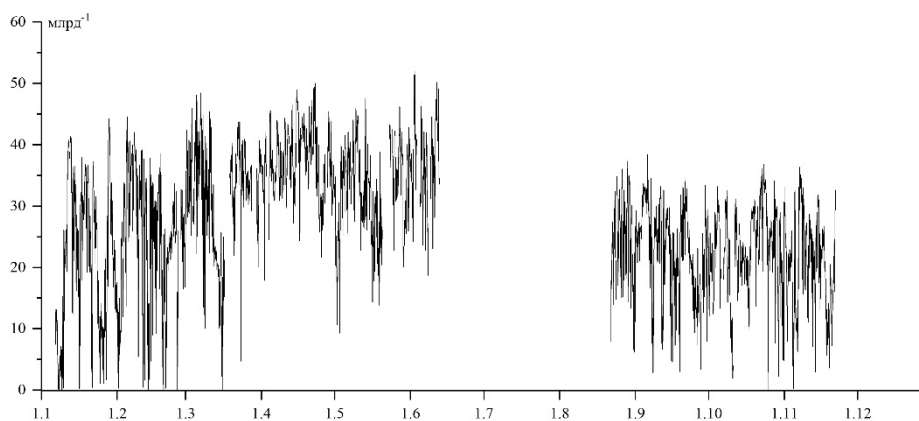


Рис. 57. Концентрации озона для января-декабря 2021 г.

В 2021 г. в г. Апатиты продолжались регулярные непрерывные измерения вертикального распределения температуры воздуха в нижнем километром слое атмосферы (рис. 58). Измерения проводятся с помощью микроволнового температурного профилера (МТП-5PE).

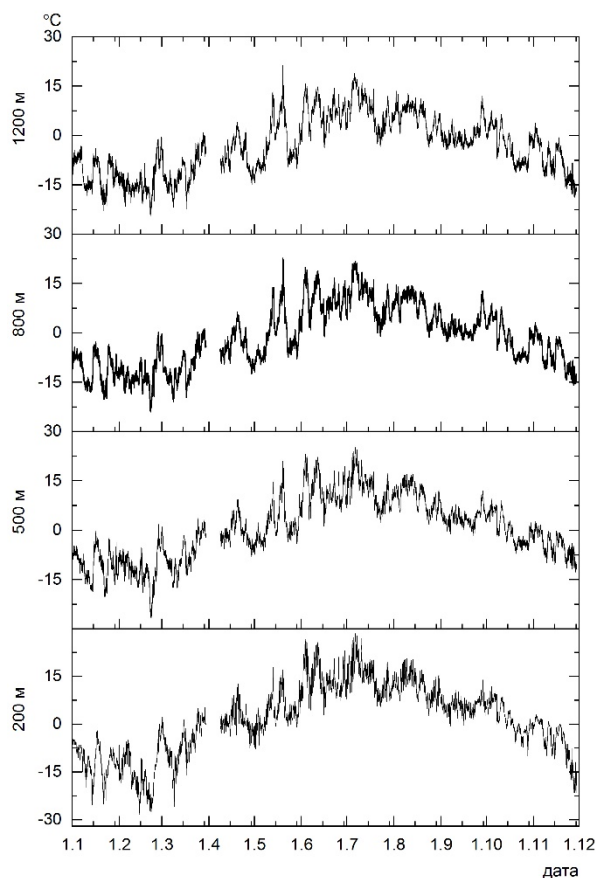


Рис. 58. Температуры воздуха в г. Апатиты на высотах 200, 500, 800 и 1200 м от поверхности Земли в 2021 г. по данным температурного профилера МТП-5PE.

Научная новизна результатов и их значимость

Результаты, представленные в настоящем отчете, в частности, касающиеся применения метода математического моделирования для исследования протекающих в околоземном пространстве и земной атмосфере процессов, являются новыми и отвечающими современному уровню исследований. Эти результаты позволяют внести новый вклад в исследования сложных физических процессов, протекающих в околоземном пространстве и атмосфере Земли.

Заключение

Настоящий промежуточный отчет по теме "Исследование вариаций химического состава, электрических явлений, неоднородной пространственной структуры и динамических процессов в атмосферах Земли и других планетных тел" содержит результаты, полученные в 2021 году. Работы в рамках настоящей темы, предусмотренные планами научных фундаментальных исследований, утвержденными на период с 2021 года, выполнены в полном объеме. Полученные результаты опубликованы, направлены в печать и доложены на региональных, всероссийских и международных конференциях. Список работ по теме, опубликованных в 2021 году, приводится ниже.

ТЕМА: Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли (FMES-2021-0012)

В рамках настоящей темы работали сотрудники сектора оптических методов, сектора космических лучей, лаборатории радиопросвечивания, лаборатории атмосферы Арктики.

В соответствии с планом НИР по теме «Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли» в 2021 году институтом продолжаются работы на архипелаге Шпицберген.

В 2021 году, несмотря на пандемию, стационарные наблюдения в обсерватории ПГИ «Баренцбург» (далее – обсерватория) проводились в полном объеме.

В обсерватории проводятся стационарные наблюдения магнитных пульсаций, ведется регистрация вариаций интенсивности космических лучей на трех секциях нейтронного монитора. В темное время суток и в период полярной ночи проводятся оптические наблюдения полярных сияний и свечения ночного неба. Также регулярно выполняются эксперименты по регистрации как искусственного, так и естественного источников электромагнитного излучения в диапазоне от 0.1 Гц до 200 Гц.

Благодаря уникальному расположению архипелага, данные, полученные в обсерватории, используются при проведении фундаментальных исследований, в том числе совместно с наблюдениями со спутников и наземных наблюдений в других регионах.

В течение года осуществлен выезд восьми сотрудников института в п. Баренцбург, проведено техническое обслуживание оборудования обсерватории, его настройка (в том числе калибровка, тестирование) и отладка после обслуживания. Выполнены работы по модернизации станции космических лучей. Проведен текущий ремонт здания рабочего павильона обсерватории, окраска наружных поверхностей здания павильона антисептическими и защитными материалами, ремонт кровли и окраска наружных поверхностей складского помещения, а также комплекс мероприятий по подготовке объектов инфраструктуры обсерватории к их эксплуатации в осенне-зимнем периоде 2021/2022 г.

Основные результаты и публикации, полученные в 2021 году:

1. Измерения среднемесячных, сезонных и среднегодовых приземных температур воздуха (ПТВ)

Рассмотрены измерения среднемесячных, сезонных и среднегодовых приземных температур воздуха (ПТВ) в Баренцбурге с декабря 1911 г. Повышение сезонных температур в 1911-2020 гг. происходит со средними скоростями 0.052, 0.052, 0.013 и 0.029°C/год (зима, весна, лето и осень соответственно), а среднегодовой – 0.036°C/год. Рост температуры происходит в основном в течение двух периодов, разделенных периодом относительного похолодания. Статистическими методами установлены их временные границы. Периодом первого потепления можно считать 1918-1934 гг. Современное потепление началось с 1970-ых гг., но в 1988-1995 гг., темпы потепления увеличились примерно в 2-3 раза по отношению к предшествующему периоду. Во второй половине 1990-ых гг. – начале 2000-ых среднемесячные ПТВ достигли уровня предыдущего потепления, а в последние 10-15 лет превысили его. По сравнению с периодом начала инструментальных измерений (1911-1918

гг.) к настоящему времени (2020 г.) зимние ПТВ в Баренцбурге повысились на 13.3°C, весенние на 8.1°C, летние на 2.8°C, а осенние на 6.5°C; среднегодовая ПТВ выросла на 7.4°C.

Серия инструментальных метеорологических наблюдений в Баренцбурге является самой длинной на Шпицбергене – с 1932 г. С учетом измерений на норвежской станции «Грин-Харбор» (в 1.5 км южнее современного положения гидрометеорологической обсерватории в поселке) и других метеорологических станций был получен композитный ряд для Баренцбурга, начинающийся с декабря 1911 г.

По данным композитного ряда в период 1912–2020 гг. в Баренцбурге происходит повышение сезонных температур со средними скоростями 0.052, 0.052, 0.013 и 0.029°C/год (зима, весна, лето и осень соответственно), а среднегодовой – 0.036°C/10 лет. Рост температуры не происходит монотонно, а наблюдается в течение двух периодов, разделенных периодом относительного похолодания. Первый из них отражает так называемое потепление Арктики середины XX века (ППСДВ), очень ярко проявившегося на Шпицбергене. Статистическими методами установлены его временные границы: 1918-1934 гг. Значимое похолодание пришлось на 1960-ые гг. С начала 1970-ых стартует слабое новое потепление, которое резко усиливается в 1988-1995 г. Во второй половине 1990-ых гг. – начале 2000-ых среднемесячные ПТВ достигли уровня предыдущего потепления, а в последние 10-15 лет превысили его во все месяцы и сезоны.

Потепление в Баренцбурге происходит в большей степени не за счет появления рекордно высоких ПТВ, а из-за увеличения частоты появления положительных аномалий ПТВ (и снижения частоты и величины отрицательных). Это отражается в разной скорости изменения верхних и нижних квантилей среднемесячных ПТВ: в большинстве месяцев рост нижних квантилей идет быстрее, чем верхних. ПТВ, которые по современным нормам соответствуют отрицательным аномалиям, в начале 20 века считались бы аномально теплыми (рис. 59).

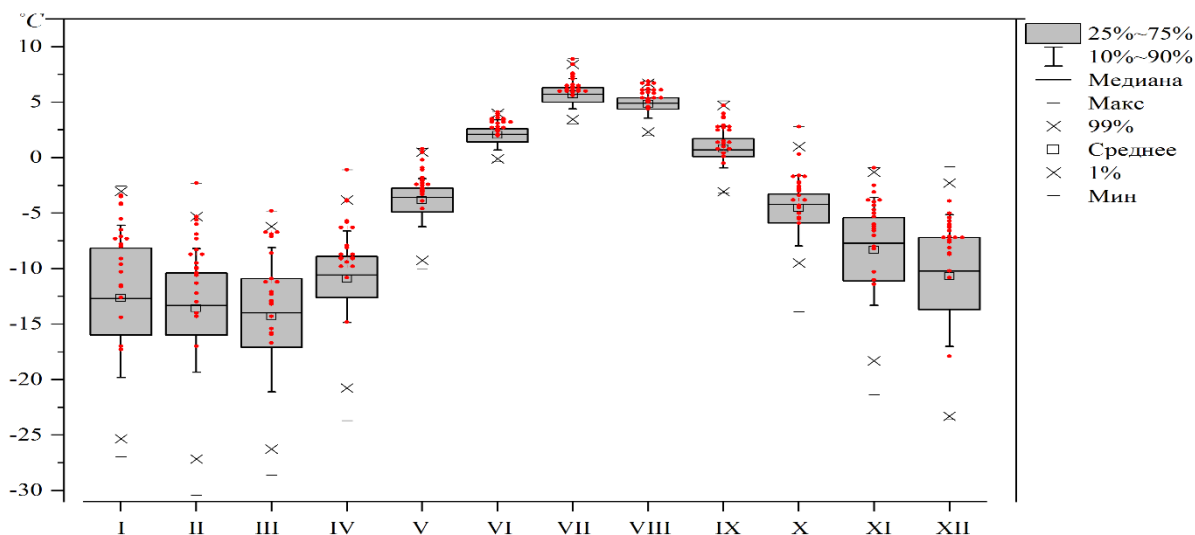


Рис. 59. Бокс-диаграмма среднемесячных значений ПТВ в Баренцбурге в 1911-2020 гг.; красным цветом выделены ПТВ в период 2001-2020 гг.

Несмотря на то, что летние ПТВ на Шпицбергене численно изменились в наименьшей степени, летние месяцы следует считать даже более аномальными, чем зимние. В последнее десятилетие (2011-2020 гг.) средние (в скобках – максимальные) значения индекса аномальности Н.А. Багрова зимой – 1.6 (3.4), весной – 1.5 (3.9), летом – 2.9 (7.9), осенью – 2.0 (7.3). Результат объясняется слабой изменчивостью летних ПТВ в регионе из-за небольших термических различий воздушных масс: средняя за летний сезон ПТВ в Баренцбурге в 78% случаев заключена в диапазоне от 3 до 5°C и в 93.5% в диапазоне от 3 до 6°C. На фоне такой

слабой изменчивости даже небольшие по абсолютной величине отклонения ПТВ от среднего уже могут рассматриваться как существенные аномалии.

Карандашева Т. К., Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX-XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы // *Российская Арктика*, 2021, №13, с.26-39. doi: 10.24412/2658-4255-2021-2-26-39.

2. Синхронные записи спектров поля атмосфериков, зарегистрированных на обсерваториях ПГИ Баренцбург и Ловозеро (27.10– 04.11) 2021 г.

Представлены экспериментальные данные спектральных характеристик поля атмосфериков (п. а.), одновременно зарегистрированных на двух разнесенных по широте обсерваториях ПГИ: Баренцбург и Ловозеро. В связи с тем, что данные обсерватории имеют разное географическое местоположение, физико-химические процессы, протекающие в околоземном пространстве, имеют разную степень солнечно-земных связей, то вполне очевидно, что АЧХ п. а. будут заметно отличаться. В качестве регистратора п. а. использовался приемник ОНЧ-излучений и регистратор спектра поля атмосфериков, разработанные и изготовлены в лаб. «Атмосфера Арктики» ПГИ. Применение в качестве приемных антенн системы ортогональных магнитных рамочных антенн позволяет получить пространственную избирательность п.а.: H_x (север-юг), H_y (запад-восток). Данный вид наблюдений продолжается в ПГИ более десяти лет. Для примера регистрации характеристик поля атмосфериков (п.а.) было выбрано два временных масштаба регистраций: 9-ти дневный временной интервал [(27.10–04.11) 2021 г.], характеризующийся повышенной солнечной активностью (рис.22,23), и суточный [27.10.2021 г.] (рис. 63).

Известно, что на АЧХ поля атмосфериков основное влияние оказывают стенки волновода Земля-ионосфера, главным образом, D-слой ионосферы, параметры которого меняются в зависимости от интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца. На рис. 60 представлены данные X-ray Flux, зарегистрированные геостационарным спутником GOES за период: (25.10 – 04.11) 2021 г.

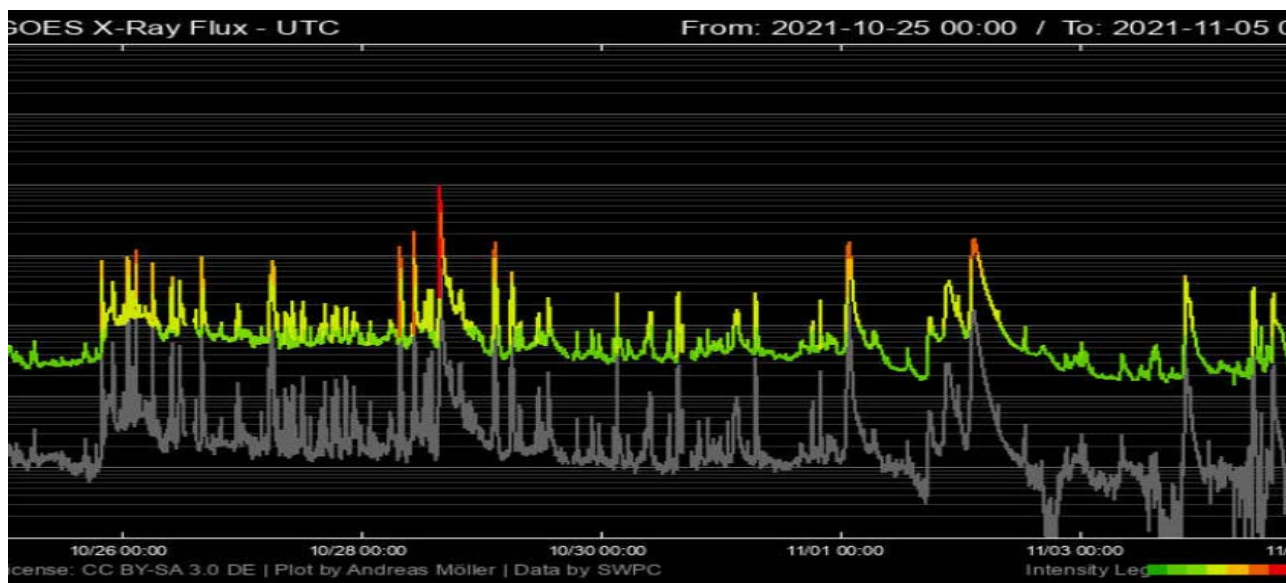


Рис. 60. Данные X-ray Flux (GOES), период записи: (25.10 – 04.11) 2021 г.

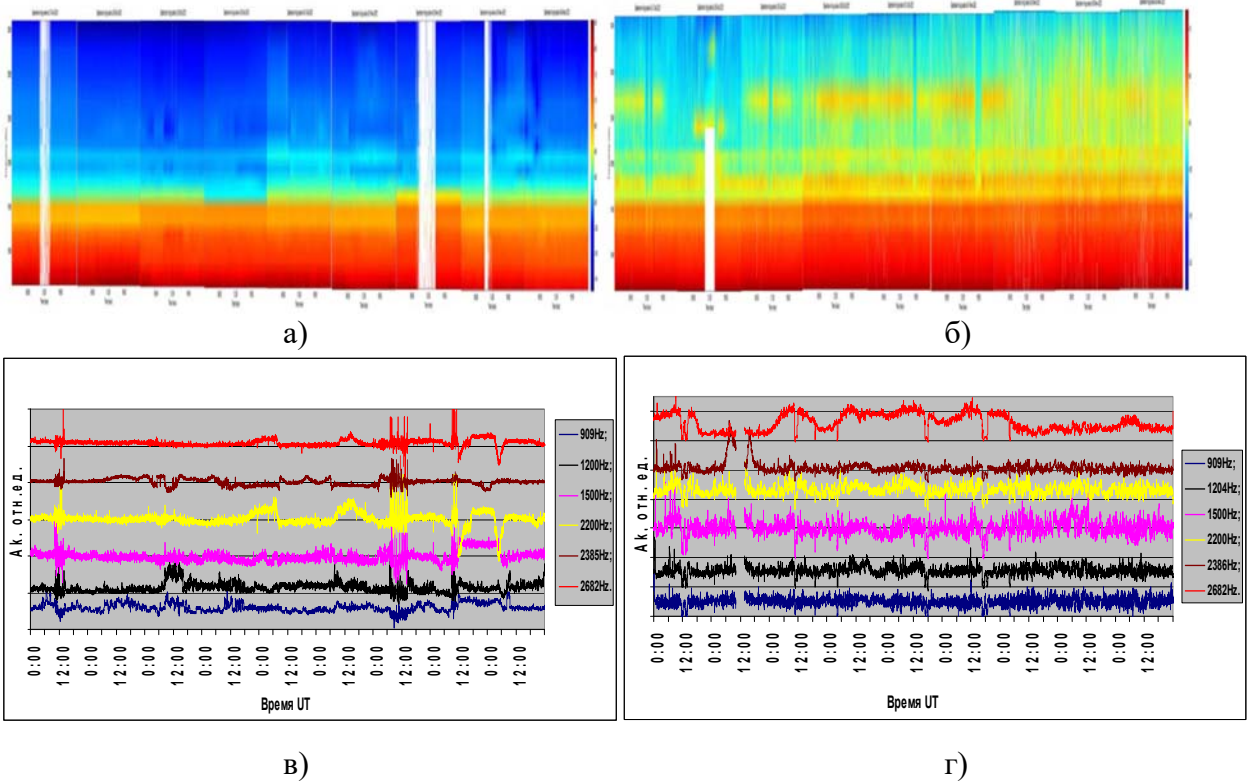


Рис. 61. Амплитудно-временные вариации магнитной компоненты H_x поля атмосфериков, выраженные в относительных единицах, за промежуток времени 24.10–04.11.2021: а) сонограмма п.а., $\Delta F=(0.6\div 3.6)$ кГц, obs. ПГИ Баренцбург; б) сонограмма п.а., $\Delta F=(0.6\div 3.6)$ кГц, obs. ПГИ Ловозеро; в) АЧХ п.а., obs. ПГИ Баренцбург; г) АЧХ п.а., obs. ПГИ Ловозеро.

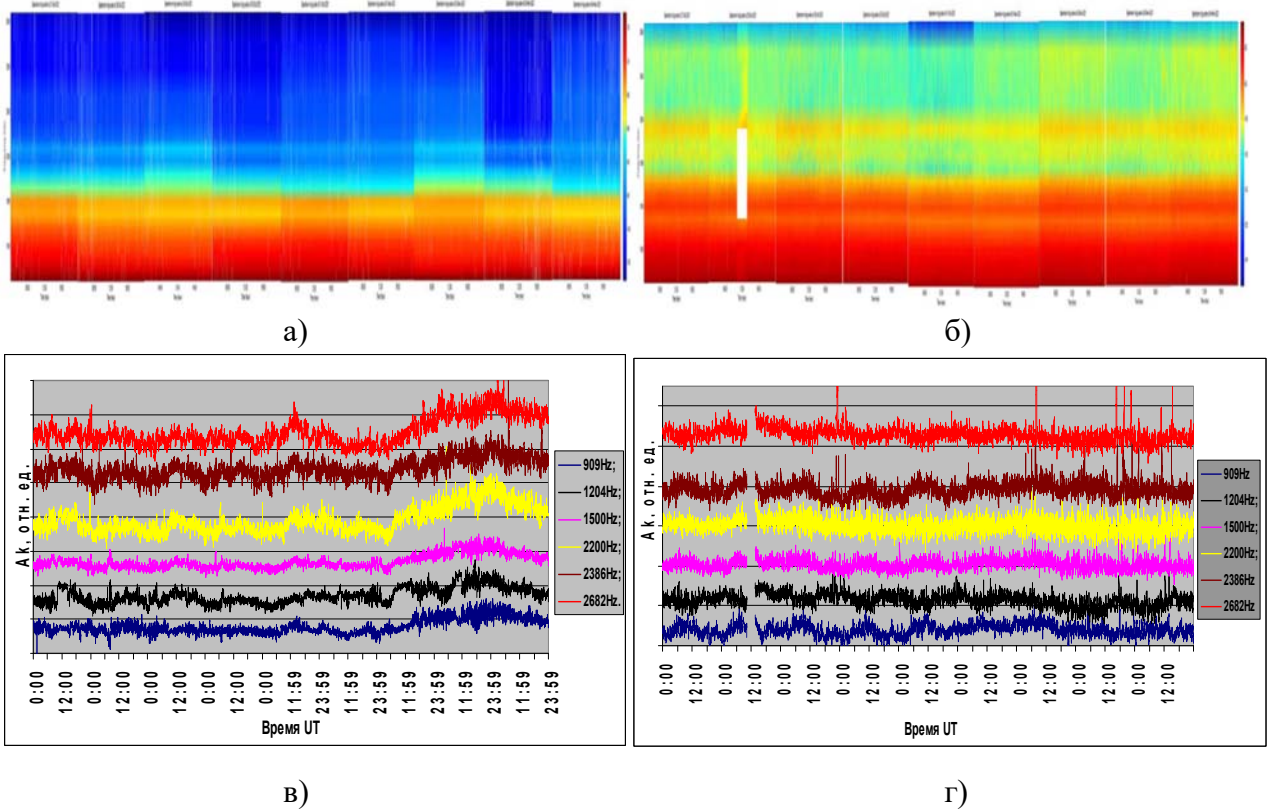


Рис. 62. Амплитудно-временные вариации магнитной компоненты H_y поля атмосфериков, выраженные в относительных единицах, за промежуток времени 24.10–04.11.2021: а) сонограмма п.а., $\Delta F=(0.6\div 3.6)$ кГц, obs. ПГИ Баренцбург; б) сонограмма п.а., $\Delta F=(0.6\div 3.6)$ кГц, obs. ПГИ Ловозеро; в) АЧХ п.а., obs. ПГИ Баренцбург; г) АЧХ п.а., obs. ПГИ Ловозеро.

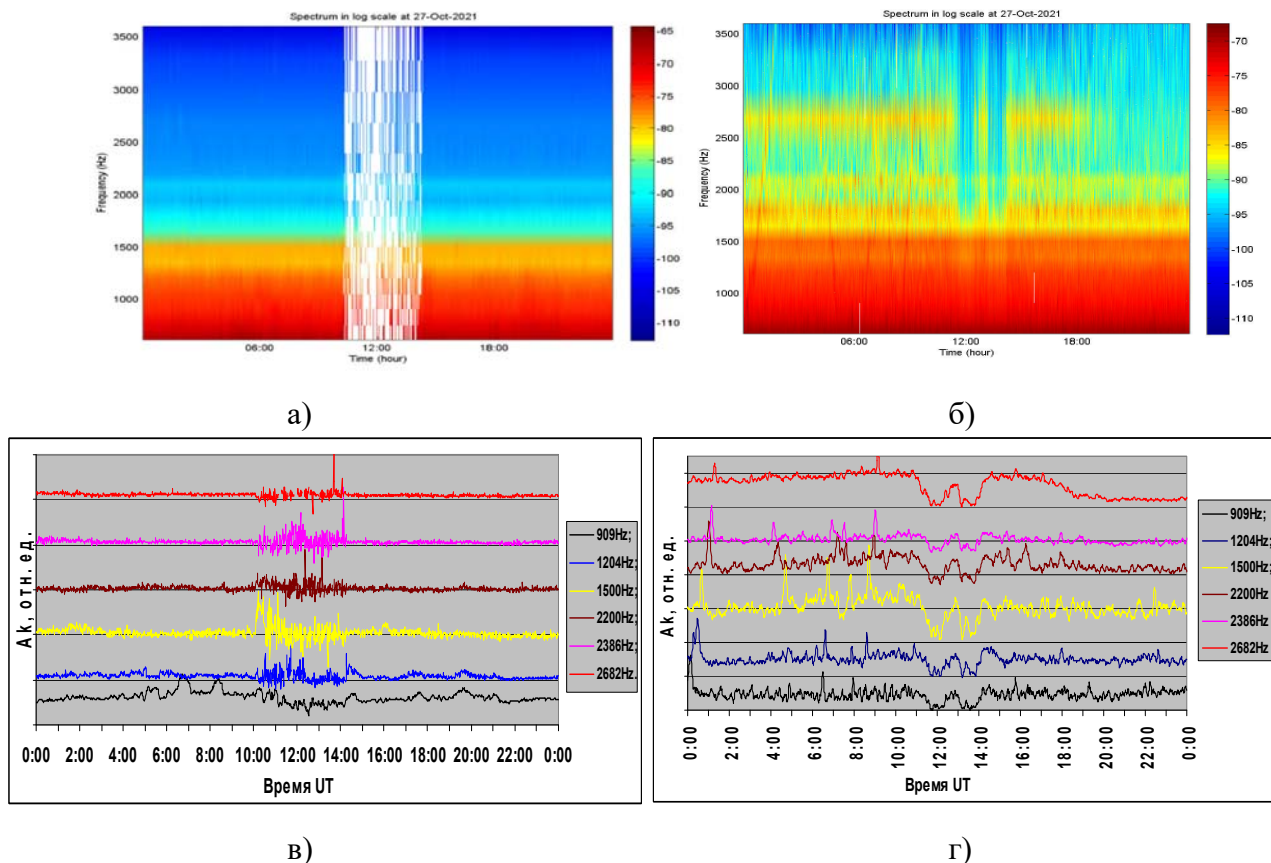


Рис. 63. Амплитудно-временные вариации магнитной компоненты H_x поля атмосфериков, выраженные в относительных единицах [27.10.2021]: а) сонограмма п.а., $\Delta F=(0.6\div 3.6)$ кГц, obs. ПГИ Баренцбург; б) сонограмма п.а., $\Delta F=(0.6\div 3.6)$ кГц, obs. ПГИ Ловозеро; в) АЧХ п.а., obs. ПГИ Баренцбург; г) АЧХ п.а., obs. ПГИ Ловозеро

На рис. 61, 62, 63 соответственно представлены АЧХ магнитных компонент п. а. H_x и H_y , зарегистрированных на obs. ПГИ Баренцбург и Ловозеро. В связи с широким динамическим диапазоном спектральных составляющих сигнала в полосе частот $\Delta F=(0.6\div 3.6)$ кГц, для лучшей наглядности вариации амплитуды каналов на графиках (рис. 3в,г и 4в,г) представлены в относительных единицах.

На рис. 63 представлены суточные вариации [27.10.2021] H_x магнитной компоненты п. а., зарегистрированных на obs. Баренцбург и Ловозеро. Белые полосы на сонограмме (рис. 63 а) означают отсутствие данных в данный момент времени.

Согласно представленным данным заметны два очевидных обстоятельства поведения АЧХ п. а. (рис. 63):

- синхронность во времени значительной вариации АЧХ п. а. на двух обсерваториях: (10.00 – 14.00).27.10;

- суточные параметры ионосферы (27.10.2021) по данным obs. Ловозеро (рис. 63г) меняют свои характеристики от режима узкополосного перестраиваемого по частоте фильтра (00:00 – 01:30) до широкополосного режекторного (10:00-14:00).

Сопоставляя временные вариации солнечной активности (рис.21) и АЧХ п. а. (рис. 61, 62, 63) можно оценить степень влияния солнечных вспышек на состояние волновода Земля – ионосфера.

3. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках.

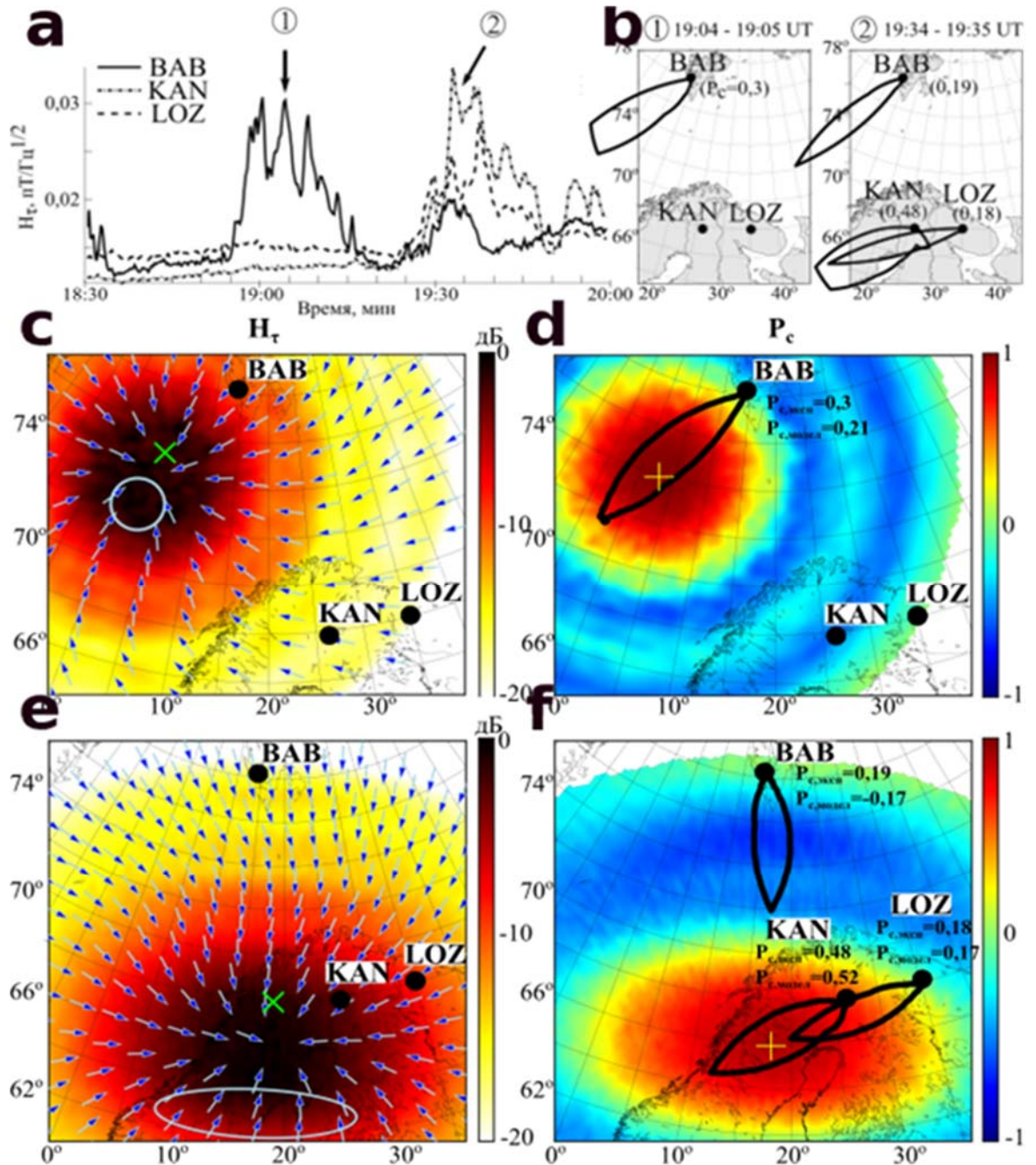


Рис. 64. Положение и форма области рассеяния аврорального хисса по данным наблюдений в пространственно-разнесенных точках; а) огибающие горизонтальной компоненты магнитного поля 03 февраля 2019 года в 18:30 - 20:00 UT в обс. Баренцбург (сплошная линия), обс. Ловозеро (штриховая линия) и Каннуслехто (штрих-пунктирная линия); б) распределения плотности потока энергии по азимутальным углам вместе с усредненными индексами круговой поляризации, рассчитанные для интервалов 1) 19:04 - 19:05 UT и 2) 19:34 - 19:35 UT; с,е) модельные распределения горизонтальной компоненты магнитного поля на земной поверхности для интервалов 1 и 2 соответственно; д), ф) модельные распределения индекса круговой поляризации магнитного поля и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам для интервалов 1 и 2.

Проведено исследование динамики области рассеяния электростатических волн аврорального хисса в конус выхода к земной поверхности по данным наземных ОНЧ-наблюдений 03 февраля 2019 года в 18:30 - 20:00 UT на станциях Баренцбург (Архипелаг Шпицберген), Ловозеро (Кольский полуостров, Россия) и Каннуслехто (Финляндия). На основе анализа поляризации и распределений плотности потока энергии по азимутальным углам и их сравнения с результатами моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности выявлено, что в случае регистрации излучений

только в Баренцбурге область рассеяния была расположена к юго-западу от точки наблюдений и имела размеры по широте и долготе много меньше расстояния между станциями (см. рис. 64 с, d). В случае регистрации излучений одновременно на трех станциях существовало две области рассеяния, разнесенные по широте. Положение и размеры одной области были схожи с наблюдаемыми в первом случае, а вторая область располагалась к юго-западу от Каннуслехта и Ловозеро. Ее размеры по долготе были сравнимы с расстоянием между этими двумя станциями, а по широте она была значительно меньше (см. рис. 64 е, f).

4. Локализация облака мелкомасштабных ионосферных неоднородностей - области рассеяния электростатических волн аврорального хисса

Представлены результаты оценки положения и размера области рассеяния на основе сопоставления результатов моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности и данных наземных наблюдений на станциях обс. Баренцбург, обс. Ловозеро и Каннуслехта, расположенных в авроральной области и полярных широтах. На примере события 03 февраля 2019 года 18:30 - 20:00 UT (см.рис.26) рассмотрены случаи регистрации хисса только в обс. Баренцбург и на всех трех станциях одновременно. Предварительная обработка записей компонент поля аналогична представленной в предыдущем разделе.

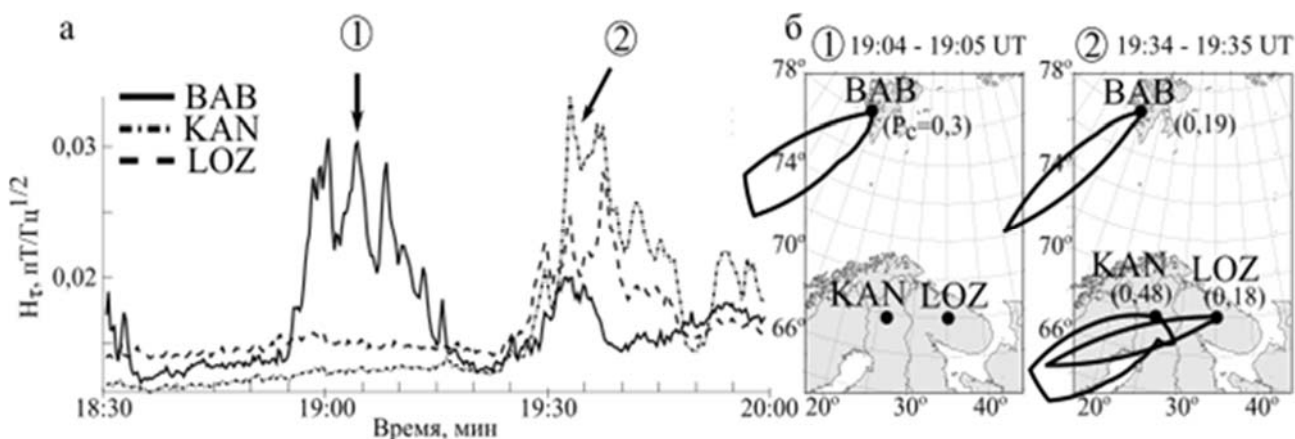


Рис. 65. а) Огибающие горизонтальной компоненты магнитного поля, полученные после фильтрации записей компонент H_x , H_y полосовым фильтром; обс. Баренцбург (сплошная линия), обс. Ловозеро (пунктирная линия) и Каннуслехта (штрих – пунктирная линия). Распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода $p(\varphi)$ вместе с усредненными индексами круговой поляризации P_c , рассчитанные для интервалов 19:04 - 19:05 UT (б) и 19:34 - 19:35 UT (в).

На рисунке 65 а) представлена огибающая горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля H_r на трех станциях для выбранного события. Из рисунка видно, что в 18:55 UT в BAB возникает всплеск, который отсутствует в KAN и LOZ, и длится до 19:17 UT. С 19:25 по 19:50 UT на станциях LOZ и KAN регистрируется последовательность всплесков хисса. Их возникновение сопровождается появлением в BAB всплеска длительностью около 10 минут. Рассчитаны распределения плотности потока энергии по обратному азимуту $p(\varphi)$ вместе с усредненными значениями индекса круговой поляризации P_c за интервалы 19:04 - 19:05 UT и 19:34 - 19:35 UT (рис. 65 б, в).

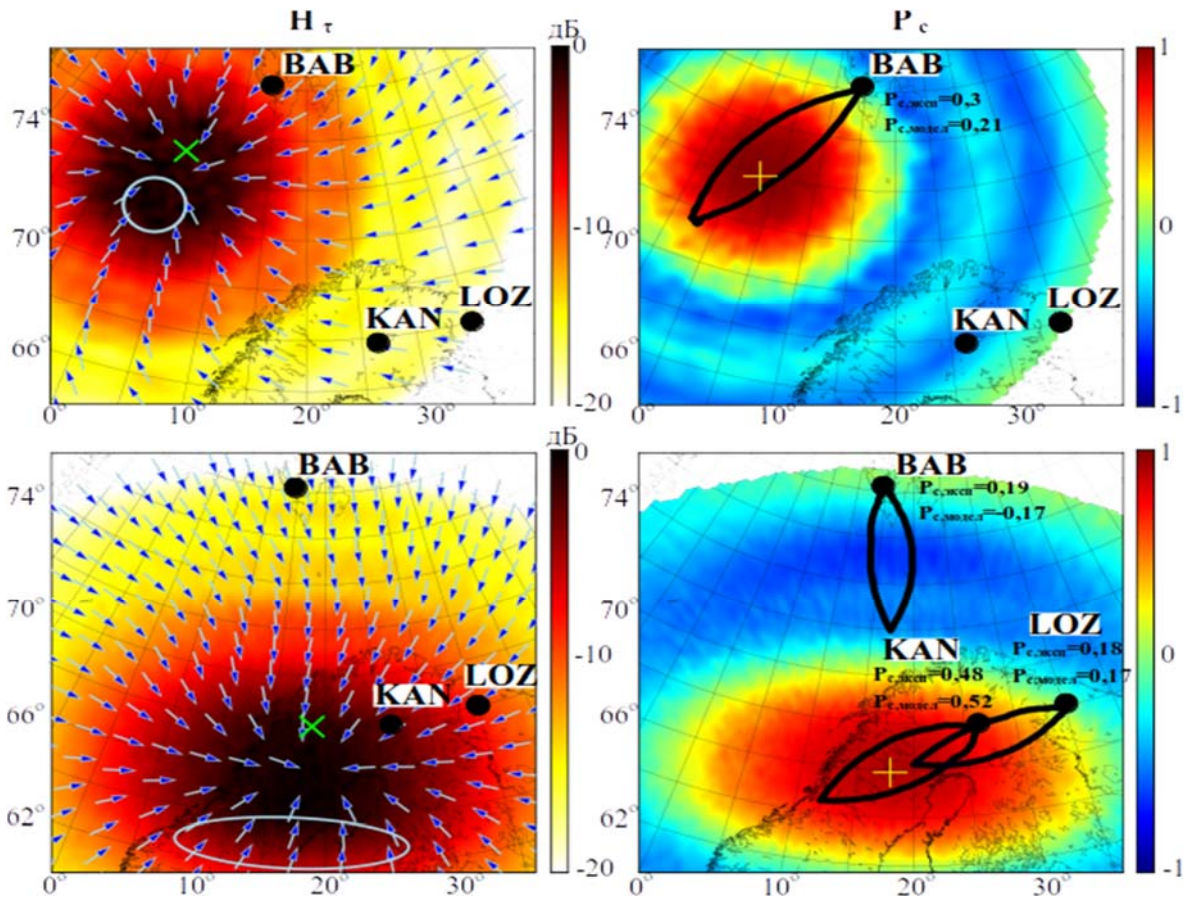


Рис. 66. Модельные распределения на земной поверхности мощности магнитного поля (рисунки слева) и индекса круговой поляризации магнитного поля P_c вместе с распределениями $p(\varphi)$ (рисунки справа), полученные для интервала 1 (а, б) и интервала 2 (в, г). Зеленым крестиком обозначена широта, на которой происходит генерация электростатических волн, желтый крестик показывает центр засвечиваемого на земной поверхности пятна, овал означает проекцию на земную поверхность уровня 0,1 гауссианы, описывающей форму области рассеяния; стрелками обозначено направление, обратное направлению вектора Пойнтинга в данной точке, полученное после усреднения компонент этого вектора.

Максимум распределения $p(\varphi)$ в ВАВ в интервал 1 указывает на юго-запад, а разброс по обратному азимуту составляет около 40 - 50 градусов. (рис. 65 б). В данном случае пучок волн приходит в точку наблюдений преимущественно с юго-западного направления. Индекс круговой поляризации P_c принимает значение 0,3, что говорит о правой эллиптической, близкой к линейной, поляризации магнитного поля этих волн. Наблюдаемые малый разброс в углах и эллиптическая поляризация, вероятно, вызваны тем, что центр засвечиваемого на земной поверхности пятна расположен достаточно далеко от ВАВ. В интервал 2 максимум распределения $p(\varphi)$ в ВАВ (рис. 65 в) указывает на юго-запад, причем разброс по углам на 10 - 15 градусов меньше, чем в интервал 1. Индекс P_c равен 0,19. Таким образом, в данную точку с юго-запада приходят практически линейно поляризованные волны. В КАН максимум распределения $p(\varphi)$ указывает на запад-юго-запад, а разброс по углам составляет около 50 - 60 градусов. Индекс P_c составляет 0,48, что говорит о правой эллиптической поляризации магнитного поля. Распределение $p(\varphi)$ в LOZ имеет значительно меньший разброс по углам (около 20 - 30 градусов), а его максимум указывает также на запад-юго-запад. Поляризация магнитного поля при этом близка к линейной - индекс $P_c = 0,18$. По-видимому, центр засвечиваемого пятна расположен ближе к КАН. В данном случае наблюдаемые во всех трех точках распределения $p(\varphi)$, поляризация и интенсивность магнитного поля могут быть

результатом существования в ионосфере как одной области рассеяния, протяженной по широте, так и нескольких локальных областей рассеяния.

Для объяснения результатов наблюдений и локализации области рассеяния, используя разработанную в ПГИ модель, проведено моделирование распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности. На рисунках 66 а и б представлены модельные распределения на земной поверхности мощности магнитного поля и индекса круговой поляризации магнитного поля при той конфигурации области рассеяния, при которой модельные распределение $p(\varphi)$ и усредненное значение индекса P_c соответствуют экспериментальным, полученным в ВАВ в интервал 1. В KAN и LOZ мощность магнитного поля на 15 - 17 децибел ниже, что, по-видимому, вызвано большим затуханием волн при распространении в волноводе Земля-ионосфера. В реальных условиях напряженность магнитного поля (рисунок 66 а) в этих точках будет меньше уровня шума волновода Земля-ионосфера.

Варьируя положение и размеры области рассеяния, не удалось подобрать такую конфигурацию, при которой были бы воспроизведены наблюдаемые на всех трех станциях в интервал 2 распределение $p(\varphi)$ и индекс P_c . Далее рассматривался сценарий, когда в этот интервал на станциях KAN и LOZ регистрируются поля, рассеянные на одной области с неоднородностями, а на станции ВАВ - рассеянные на другой области. Наблюдаемые в ВАВ распределение $p(\varphi)$ и индекс P_c похожи наблюдаемым в интервал 1. Наблюдаемые на станциях KAN и LOZ распределение $p(\varphi)$ и индекс P_c в интервал 2 удалось воспроизвести при форме и размерах области, представленной на рисунках 66 в, г. В рассматриваемый момент времени южнее точек KAN и LOZ существовала вытянутая по долготе область рассеяния.

Проведен анализ данных наземных наблюдений аврорального хисса с применением модели распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности. Показано, что в рассмотренных случаях область рассеяния электростатических волн в конус выхода к земной поверхности была локальна, а ее размеры по широте много меньше расстояния между станциями. Размеры области рассеяния по долготе были или меньше расстояния между станциями, или сравнимы с этим расстоянием. Анализ распределения потока энергии по углам позволил выявить случай, когда на разных широтах одновременно существовало две области рассеяния. Выделено 4 типа пространственной структуры области рассеяния аврорального хисса и сформулированы отличительные особенности поведения поля излучений, соответствующие тому или иному типу.

А. С. Никитенко, О. М. Лебедь, Ю. В. Федоренко и др. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 3. — С. 398–403. 10.31857/s0367676521030200.

А.С. Никитенко, М.В. Кузнецова, Ю.В. Федоренко, и др. Ионосферная область рассеяния ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в высоких широтах // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. (в печати)

5. Магнитные суббури и сияния в полярных широтах Шпицбергена.

По данным наблюдения сияний в обсерватории Баренцбург (арх. Шпицберген), магнитометров сетей SuperMAG и IMAGE и спутников проекта AMPERE проведен сравнительный анализ развития двух полярных суббурь, наблюдавшихся над Шпицбергеном 17 декабря 2012 г. Оба события относятся к полярным суббурям, то есть магнитные бухты были зарегистрированы только на широтах выше $\sim 72^\circ$ MLAT и сопровождалась

геомагнитными пульсациями $Pi2$, а также наблюдались в спокойных условиях, при V_z ММП > 0 . Но первая полярная суббуря, которая наблюдалась в вечернем секторе ($\sim 16-17$ UT), представляла собой сложное явление, она наблюдалась на фоне полярной экспансии (“poleward leap”) западного края электроджета другой околополуночной авроральной суббури, зарегистрированной немного раньше на более восточных станциях Диксон и Тикси. Вторая суббуря наблюдалась в ночном секторе в $\sim 21:30$ UT как «обычная» полярная суббуря. Показано, что полярная вечерняя суббуря, развивавшаяся в сложных условиях, отличалась от обычной полярной суббури по формам полярных сияний, распределению продольных токов и среднеширотным эффектам.

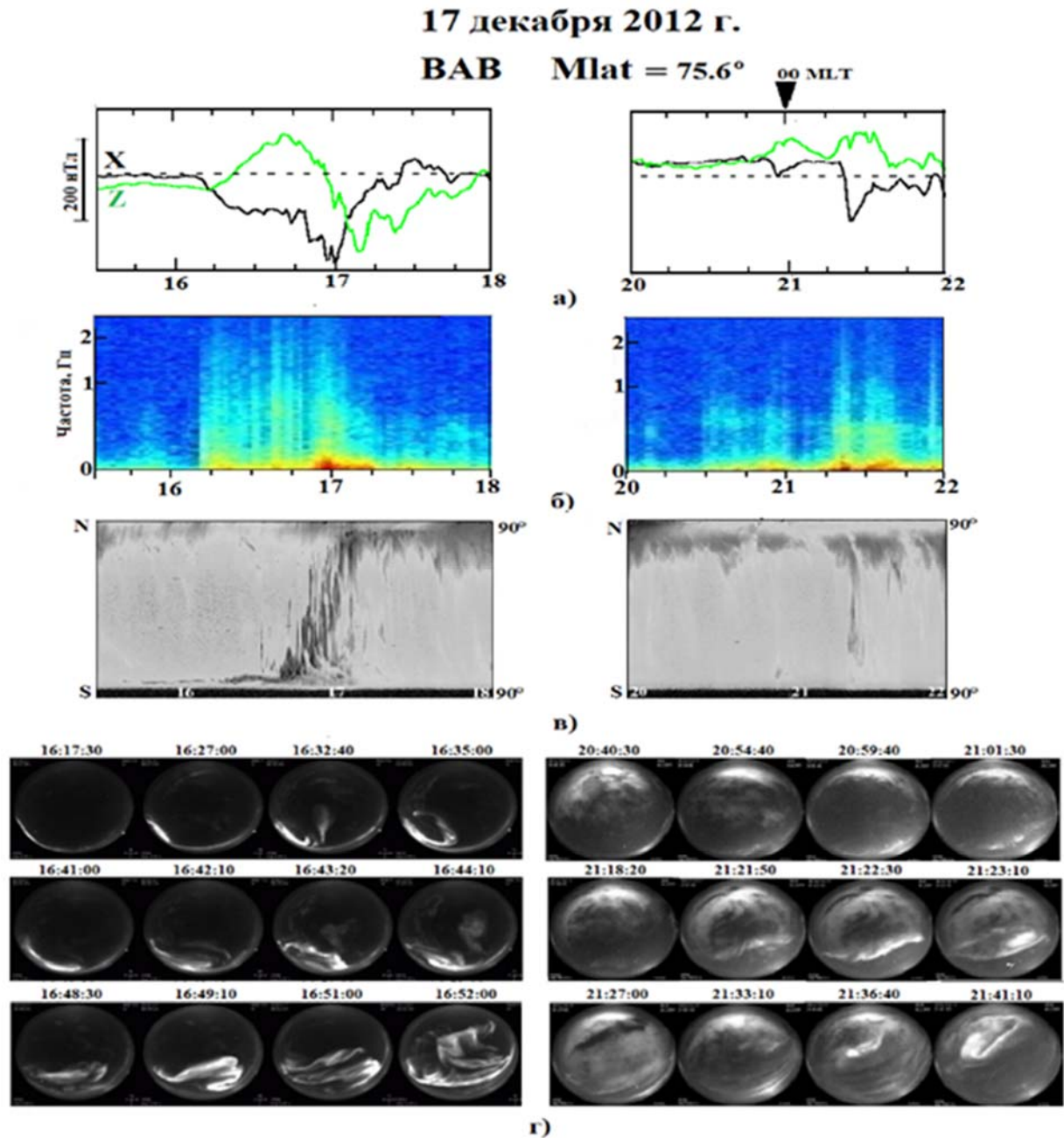


Рис. 67. Данные обсерватории «Баренцбург» за 17 декабря 2012 года во время первой суббури, с 15:30 до 18:00 UT (слева) и второй суббури, с 20 до 22 UT (справа): а) вариации X- и Z- компонент магнитного поля; б) спектрограммы в диапазоне частот от 0.01 до 3 Гц; в) кеограммы, полученные по данным камеры всего неба и г) выбранные кадры камеры всего неба с 16:17:30 до 16:52:00 UT и с 20:40:30 – 21:41:10 UT.

Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любчич А.А., Малышева Л.М., Громова Л.И., Ролдугин А.В., Козелов Б.В. Магнитные суббури и сияния в полярных широтах Шпицбергена: события 17 декабря 2012 // Известия РАН. Серия физическая. 2022. принята в печать.

6. Расчет скорости ионизации во время события GLE с использованием глобальной модели атмосферы земли и оценка вклада в этот процесс частиц галактических космических лучей.

В ПГИ сотрудниками лаборатории КЛ при помощи пакета для разработки программ GEANT4 разработана модель для расчета прохождения КЛ через атмосферу Земли. Входными параметрам являются спектры КЛ, как галактических (ГКЛ), так и солнечных (СКЛ). Выходными данными являются наборы спектров вторичного излучения, скорости ионизации и эквивалентной дозы на заданных высотах. Для получения спектров первичных частиц в работе используется методика, разработанная в ПГИ, основанная на использовании данных собственных нейтронных мониторов, в том числе расположенных в Баренцбурге, арх. Шпицберген.

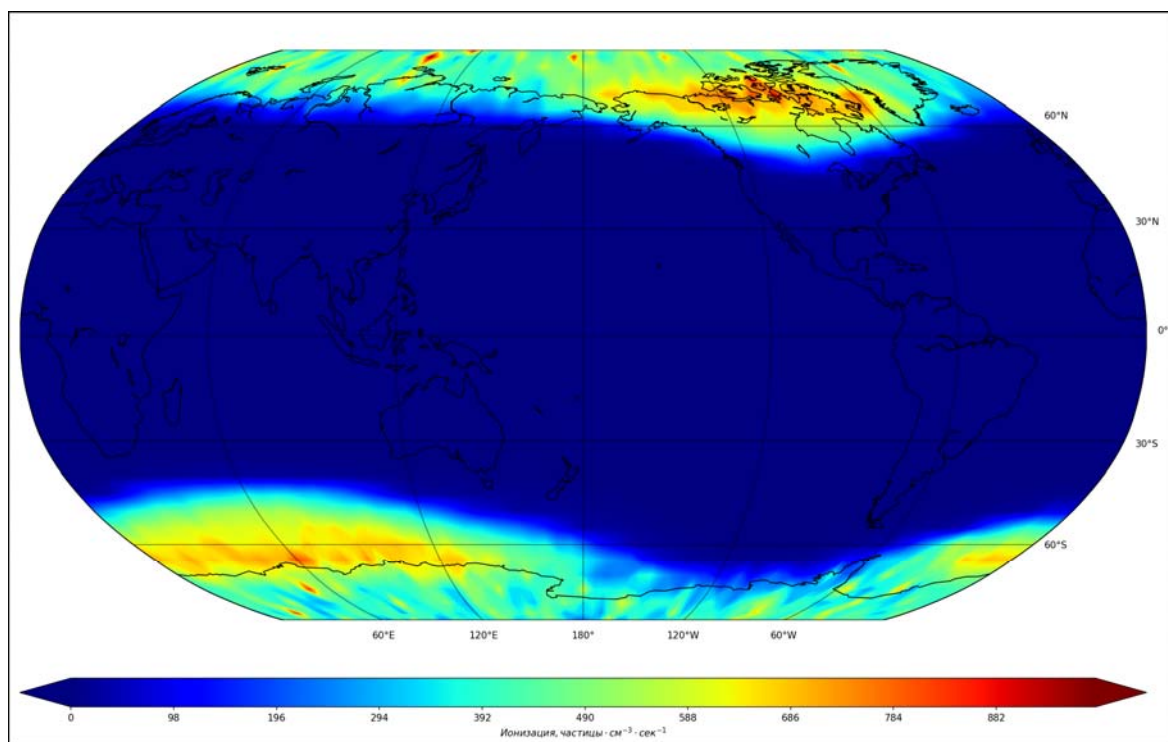


Рис. 68. Карта скорости ионизации атмосферы Земли, соответствующая высоте 10 км над уровнем моря. Результат получен при помощи глобальной модели и для источника первичных протонов, имеющих энергетический спектр первичных СКЛ, соответствующий времени события GLE №72.

Отличительной особенностью такого подхода является то, что для получения формы реального спектра солнечных КЛ на условной границе атмосферы Земли (в моделировании нами она установлена равной 80 км) необходимо учитывать не просто вертикальную жесткость геомагнитного обрезания (как в случае с изотропным потоком ГКЛ), но и конусы их приема. В качестве примера получаемого типового результата можно представить глобальную сетку значений скорости ионизации атмосферы Земли для первичных протонов с энергетическим спектром, соответствующим событию GLE72 на высоте 10 км от уровня моря (рис. 68). Следует заметить, что все данные, полученные в результате моделирования (для высот от 1 км до 79 км с шагом в 1 км), сохраняются на сайте <https://ruscosmics.ru/SCR.htm>. В будущем предполагается создание целой системы, которая объективно и в оперативном

режиме сможет оценивать эквивалентную дозу от вторичных частиц КЛ в области высоких широт. В первую очередь, такая информация необходима для обеспечения радиационной безопасности экипажей воздушных судов при выполнении перелетов через полярные области. Для решения этой задачи крайне необходимы экспериментальные данные, полученные не только при помощи нейтронных мониторов, но и с использованием детекторов различного типа (мюоны, гамма-кванты, электроны), расположенных на архипелаге Шпицберген.

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б. Расчет скорости ионизации во время события GLE с использованием глобальной модели атмосферы земли и оценка вклада в этот процесс частиц галактических космических лучей с $Z > 2$ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021 Т. 85. № 3. С. 388-392.

7. Высота аврорального свечения по данным триангуляционных измерений.

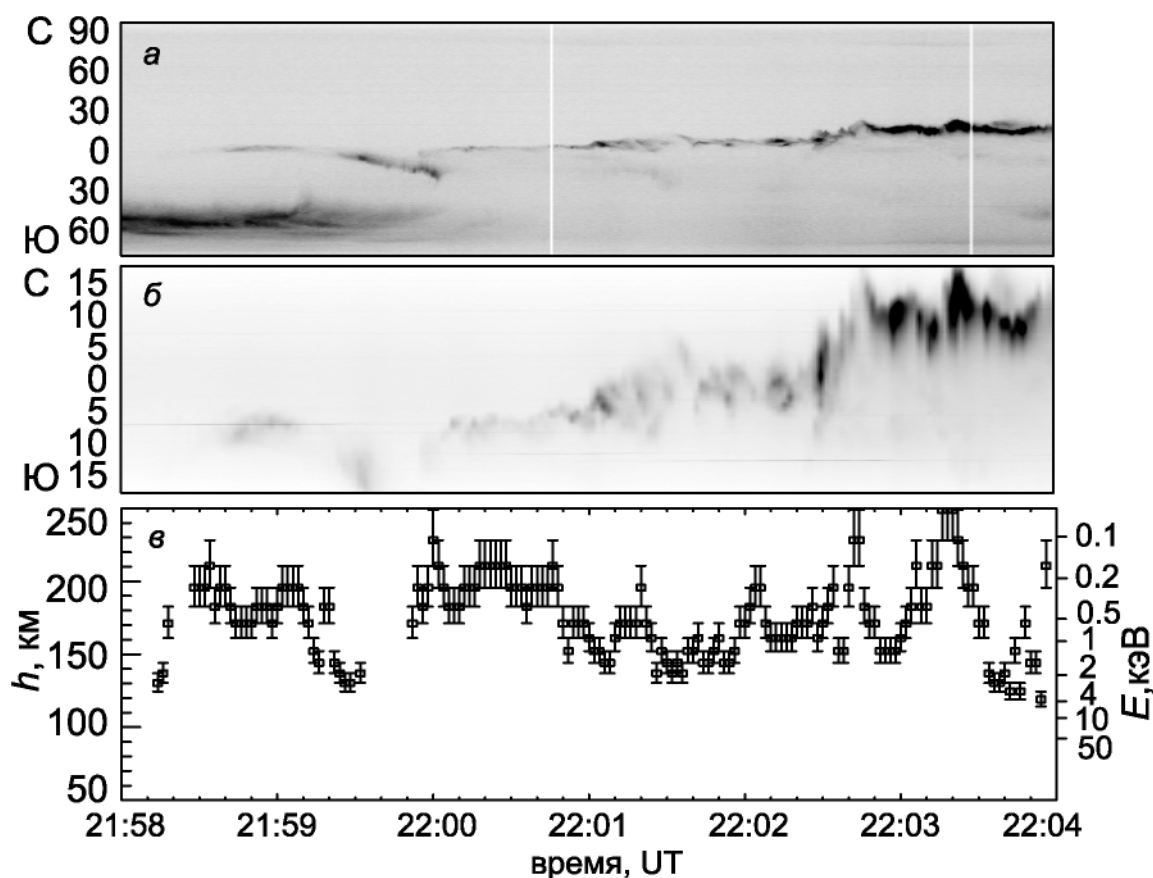


Рис. 69. Свечение неба, зарегистрированное камерами в Баренцбурге (Шпицберген) 9 февраля 2019 г. с 21:58UT до 22:04UT: кеограмма для разреза в направлении север-юг, построенная по данным камеры ASC (а); кеограмма для разреза в направлении север-юг, построенная по данным камеры NAC(б); зависимость эффективной высоты авроральных структур в поле зрения камеры NAC(в), ось справа – энергия электронов, высотный профиль энерговыделения для которых имеет максимум на соответствующей высоте. Зенитные углы на панелях, а-б в градусах.

Работающие в настоящее время авроральные камеры в Апатитах и на Шпицбергене позволяют получать высоту аврорального свечения триангуляционными измерениями с малой базой. Сравнение с модельными расчетами позволяет оценить среднюю энергию высыпавшихся авроральных электронов. Представлены примеры авроральных событий, в которых на масштабе десятки секунд - минуты прослеживается прямая связь энергии электронов и интенсивности аврорального свечения: повышение интенсивности свечения сопровождается уменьшением высоты, т.е. повышением энергии. Первые два события –

появление и последующее уярчение лучистой дуги, а также увеличение интенсивности свечения в широкой авроральной полосе – рассмотрены по данным камер на Шпицбергене, т.е. на полюсной границе аврорального овала, однако подобные события наблюдаются и на меньших широтах. Третье событие – пульсирующие сияния – характерно для экваториальной части аврорального овала и наблюдались камерами в Апатитах.

В рассмотренных случаях средняя энергия электронов не превышала 10 кэВ, а изменение энергии в событие – менее 8 кэВ. Можно предположить, что, несмотря на морфологические различия в авроральных формах и положении в авроральном овале, во всех рассмотренных случаях одновременное увеличение энергии электронов и интенсивности аврорального свечения связано с дополнительным ускорением потока частиц в околоземной области ускорения.

Полученные оценки высоты аврорального свечения и энергии электронов хорошо согласуются с результатами других исследователей. В отличие от предыдущих работ, ограничивающихся рассмотрением спокойных дуг по данным далеко (более 10 км) разнесенных камер, использование малой базы при триангуляционных измерениях позволяет в динамике оценивать высоту аврорального свечения для практически любой достаточно контрастной авроральной структуры в поле зрения. При этом не требуется использовать достаточно сложных и не всегда однозначных алгоритмов томографической реконструкции.

Б.В. Козелов, А.В. Ролдугин, Высотное распределение аврорального свечения по данным триангуляционных измерений с малой базой в Апатитах и Баренцбурге // PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA, 44th Annual Seminar, Abstracts, с.62. 2021

Б.В.Козелов, А.В.Ролдугин, Высота аврорального свечения на полюсной и экваториальной границах аврорального овала по данным триангуляционных измерений с малой базой // Известия РАН. Серия физическая. Принята к публикации (2021).

Научная новизна

Все полученные результаты соответствуют мировым стандартам, отвечающим современному уровню геофизических исследований. При выполнении работы использованы оригинальные данные, полученные в ходе измерений с применением научной аппаратуры мирового уровня, установленной в обсерватории ПГИ «Баренцбург» на архипелаге Шпицберген.

Возможность практического применения

Полученные в ходе выполнения темы результаты, могут найти практическое применение в разработке аппаратуры радиосвязи, радионавигации и радиолокации, а также при дистанционном зондирования ионосферы и литосферы Земли и заметно повысить их достоверность и экономическую эффективность.

Накопленные экспериментальные данные и теоретические интерпретации в дальнейшем будут использоваться при проведении фундаментальных научных исследований гелиогеофизических процессов в Арктической зоне, а также при планировании и проведении будущих экспериментов.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

1. Общая информация

Международное научно-техническое сотрудничество федерального государственного бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический институт» (ПГИ) в 2021 г. осуществлялось по следующим традиционным направлениям:

- участие в международных программах и экспериментах,
- работа сотрудников института в зарубежных научных организациях,
- подготовка совместных публикаций,
- участие в международных конференциях, семинарах, официальных встречах.

Совместная работа с зарубежными научными организациями проводилась по основным научным направлениям института в области исследования космических лучей, изучения физических процессов в магнитосфере и высокоширотной ионосфере Земли, состава и динамики атмосферы высоких широт, изучения солнечно-земных связей.

Необходимо отметить, что в связи с пандемией, большая часть запланированной международной деятельности либо была перенесена в онлайн формат.

2. Взаимодействие с международными организациями и государственными органами иностранных государств в научной сфере

Сотрудничество ученых ПГИ с учеными зарубежных научных организаций и университетов Норвегии, Финляндии, Чехии, Болгарии, Китая, Японии, Швеции, Польши и Германии происходит в рамках двусторонних и многосторонних Соглашений:

- Соглашение о сотрудничестве между геофизической обсерваторией университета Оулу (Соданкюля, Финляндия) и Полярным геофизическим институтом (Мурманск-Апатиты, Россия);
- Соглашение о сотрудничестве между Институтом физики атмосферы АН ЧР (Прага, Чешская Республика) и Полярным геофизическим институтом (Мурманск-Апатиты, Россия);
- Соглашение об академическом обмене между Институтом космических исследований Земли (Нагоя, Япония) и Полярным геофизическим институтом (Мурманск, Россия);
- Соглашение о научном сотрудничестве между Университетом Тромсе – Арктическим университетом Норвегии (Тромсе, Норвегия) и Полярным геофизическим институтом (Мурманск-Апатиты, Россия);
- Соглашение о научном сотрудничестве между Китайским институтом распространения радиоволн (Циндао, Китай) и Полярным геофизическим институтом (Мурманск-Апатиты, Россия);
- Соглашение о сотрудничестве между Национальным Космическим Научным Центром Китайской Академии Наук и Полярным геофизическим институтом (Мурманск-Апатиты, Россия) в рамках международной программы меридианного круга;
- Соглашение о сотрудничестве по укреплению сотрудничества в области технического обслуживания Международного Монитора Авроральных Геомагнитных Эффектов (IMAGE).

3. Деятельность института в международных организациях

В отчетный период ПГИ продолжил активное участие в работе научных организаций, комитетов и ассоциаций. Ниже приведены примеры взаимодействия сотрудников института с иностранными коллегами из зарубежных университетов и научных организаций в рамках деятельности международных коллабораций.

С 1978 года и по настоящее время ученые ПГИ совместно с зарубежными представителями Европейской Ассоциации некогерентного рассеяния EISCAT осуществляют исследования в области ионосферы в высоких широтах.

С 1994 года институт принимает участие в международном мониторинге авроральных геомагнитных эффектов (IMAGE). Целью данного сотрудничества является создание и организация базы магнитометрических данных в Северной Европе. Мониторинг осуществляется на основе регулярных измерений вариаций геомагнитного поля в различных точках Скандинавии и Севера России.

С 2018 года ПГИ является участником международной программы меридианного круга (IMSP). Целью программы является использование в полной мере наземной аппаратуры для совместного изучения космической погоды вдоль меридианного круга $120^{\circ}\text{E}/60^{\circ}\text{W}$, проходящего через различные страны и регионы, включая Китай, Россию, Канаду, США, Южную Америку, Антарктиду и Австралию и т. д. В 2021 году сотрудники ПГИ приняли участие в совместных наземных наблюдениях с полным использованием аппаратуры для изучения геокосмической системы как интегрированной системы в глобальном контексте.

В 2021 году 5 сотрудников ПГИ приняли непосредственное участие в исследованиях по совместному проекту, проводимых за пределами России (Финляндия, Болгария). Также 2 сотрудника Института очно приняли участие в международной научной конференции «Влияние солнца на магнитосферу, ионосферу и атмосферу» в Болгарии, на которой они представляли и обсуждали с коллегами результаты своих исследований.

4. Взаимодействие с зарубежными научно-образовательными организациями/зарубежными странами в рамках проектной деятельности

Сотрудничество ученых ПГИ с зарубежными учеными происходит в рамках двусторонних Соглашений или в рамках действующих проектов и программ. Ниже кратко перечислены проекты, которые были реализованы в 2021 году.

1. Название проекта: *IMAGE*, создание базы магнитных данных.

Цель проекта: обработка магнитометрических данных обсерватории Ловозеро.

Сроки выполнения проекта: бессрочный.

Участники: ПГИ (Россия) и Финский Метеорологический Институт (Финляндия).

2. Название проекта: «Исследование распространения геомагнитных возмущений в средние широты и выявление их межпланетных драйверов для разработки методов прогноза среднеширотной космической погоды»

Участники: ПГИ (Россия) и Институт космических и солнечно-земных исследований БАН, Филиал Стара Загора, Болгария.

3. Название проекта: «*Aurora Borealis monitoring system for tourism business needs*».

Источник финансирования: грант программы Коларктик 2014-2020 г.г.

Сроки выполнения проекта: 2021-2022.

Участники: ведущий партнер проекта - ПГИ, партнеры со стороны Мурманской области ООО «Социум+», ФГБУ «Государственный заповедник Пасвик», от Финляндии -

Метсэхаллитус, организация по контролю за заповедниками в Лапландии (Рованиеми), от Норвегии - Норвежский Институт Биоэкономических Исследований (Сванвик).

В 2021 году сотрудники и руководство института приняли участие в 3 международных мероприятиях для научно-образовательных организаций, государственных органов и бизнес сообществ в рамках международного сотрудничества, которые проходили в офлайн формате:

1. Мероприятие: XI дни российско-норвежского приграничного сотрудничества
Место и дата проведения: г. Никель, Мурманская область, 22-23 октября 2021 г.
2. Мероприятие: IV международной сессии «сотрудничество в Арктике»
Место и дата проведения: Мурманск, Россия, 25 ноября 2021г.
3. Мероприятие: XI международный форум «Арктика: настоящее и будущее»
Место и дата проведения: Санкт-Петербург, Россия, 2-5 декабря 2021г.

В августе и ноябре 2021 года в рамках международного проекта «Система мониторинга северного сияния для нужд туристического бизнеса», реализуемого в рамках Программы Коларктик 2014-2020, целью которого является использование научных ресурсов для развития туризма в Арктике, рабочей группой ПГИ, заповедника «Пасвик» и Норвежского института биоэкономических исследований (NIBIO) на территориях заповедника Пасвик (Мурманская область, Россия), и экологического центра Сванховд (Сванвик, Норвегия) на постоянной основе установлены патрульные авроральные камеры, позволяющие круглогодично при любых погодных условиях наблюдать такие природные явления Севера, как полярные сияния, свечение воздуха и жемчужные облака. Кроме того, организована прямая трансляция изображений камер на интернет-ресурсах участников проекта. Камеры подключены к внутреннему серверу ПГИ и успешно протестированы. Вскоре еще одна камера будет установлена на территории национального парка Финляндии (Инари, Финляндия).

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

1. Общие сведения

В 2021 году исследования в ПГИ проводились в традиционных для института направлениях, включенных в Программу фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021-2030 годы. Они охватывают современные проблемы радиофизики и акустики, физики плазмы и элементарных частиц, исследования космического пространства и солнечно-земных связей. Получены новые важные результаты в области исследования искусственных и естественных электромагнитных и электростатических эмиссий в высокоширотной магнитосферно-ионосферной системе, космических лучей и связанных с ними радиационных эффектов, механизмов взаимодействия волна-частица в околоземной космической плазме, фотохимических процессов в ионосфере, а также в области математического моделирования динамических процессов в атмосфере Земли. Кроме того, часть работ в 2021 году выполнялась в продолжение уже начатых в прошлые годы проектов российских и международных фондов:

- РФФИ № 19-52-50025 (ЯФ_а 2019): «Комплексный анализ авроральных и субавроральных явлений по данным спутника ERG и российским и японским наземным наблюдениям на северо-западе России и в Скандинавии» (2019-2021). Руководитель проекта: к.ф.-м.н. Яхнин А.Г.
- РФФИ № 19-05-00823 (А 2019): «Особенности поляризационных характеристик КНЧ сигналов, возбуждаемых на низкопроводящей Земле» (2019-2021). Руководитель проекта: д.ф.-м.н. Терещенко Е.Д.
- РФФИ № 18-77-10018: «Потоки высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве, и их воздействие на атмосферу Арктики» (2021-2022). Руководитель проекта: к.ф.-м.н. Белаховский В.Б.
- РФФИ № 20-55-18003 (Болг_а 2020): «Исследование распространения геомагнитных возмущений в средние широты и выявление их межпланетных драйверов для разработки методов прогноза среднеширотной космической погоды» (2021-2023). Руководитель проекта: к.ф.-м.н. Дэспирак И.В.

2. Деятельность Ученого совета

В 2021 году на заседаниях Ученого совета рассматривались наиболее важные вопросы, связанные с научной и научно-организационной деятельностью института: обсуждение и утверждение планов и отчетов по НИР, организация конференций, издательская деятельность института и другое. Всего проведено 5 заседаний Ученого совета, на которых рассмотрено более десятка вопросов.

В связи с истечением полномочий действующего директора ПГИ д.ф.-м.н. Козелова Б.В. было проведено рассмотрение и утверждение заявок в кандидаты на выборы директора ПГИ. По результатам открытого голосования (единогласно) рекомендовали заявки к.ф.-м.н. Орлова К.Г., д.ф.-м.н. Мингалева И.В., к.ф.-м.н. Белаховского В.Б. и к.ф.-м.н. Юрика Р.Ю. для участия в выборах на должность директора ПГИ с последующим согласованием кандидатов в Министерстве Образования и науки.

Также на заседании Ученого совета утвердили внесение изменений в устав ПГИ. Внесение изменений в Устав согласно информационному письму от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации необходимо для приведения их в соответствие с нормами Федерального закона от 25.05.2020 № 157-ФЗ «О внесении изменений в Трудовой

кодекс Российской Федерации в части установления предельного возраста для замещения должностей руководителей, заместителей руководителей государственных и муниципальных образовательных организаций высшего образования и научных организаций и руководителей их филиалов».

Также Ученый совет поддержал участие сотрудников Института в различных конкурсах: в конкурсном отборе получателей стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (Конкурс на 2022-2024 гг.) и в региональном конкурсе от организаций Мурманской области, организованном Российским научным фондом.

3. Деятельность аспирантуры

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт» (ПГИ) в соответствии с лицензией №2330, выданной Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки 12.08.2016 г., приложением к лицензии №0034628, выданным 12.08.016 г., осуществляет образовательную деятельность по программам высшего образования - программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлениям:

05.06.01 "Науки о земле": 25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы (формы и сроки обучения: очная - 3 года; заочная - 4 года).

16.06.01 "Физико-технические науки и технологии": 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы; 01.04.03 – Радиофизика (формы и сроки обучения: очная - 4 года; заочная - 5 лет).

В октябре 2021 г. была проведена государственная итоговая аттестация для аспиранта ПГИ заочной формы обучения по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы» с использованием телекоммуникационных технологий. Такой формат проведения итоговой аттестации был проведен впервые и показал свою эффективность. В настоящее время в Институте обучается один очный аспирант.

На заседании Ученого совета был утвержден председатель государственной аттестационной комиссии (ГЭК) на 2022 год - д.ф.-м.н. Намгаладзе А.А.

Для иногородних поступающих в г. Апатиты имеется благоустроенное общежитие "Дом молодых специалистов с кафе", расположенное по адресу: ул. Ферсмана, д. 2.

Подробная информация о поступлении в аспирантуру ПГИ представлена на сайте: <http://pgi.ru/aspirantura/>.

Научные кадры

Численность штатного состава сотрудников института изменилась в меньшую сторону по сравнению с прошлым годом и составила на 1 декабря 2021 года 125,66 шт.ед. (130 чел.). Численность научных работников увеличилась по сравнению с прошлым годом и составляет 43,8 штатных единиц (47 чел.). По данным на 1 декабря 2021г., в институте работают 20 кандидатов наук и 9 докторов наук, по сравнению с 2020 годом число кандидатов и докторов наук уменьшилось на 5 и 1, соответственно. Численность научных сотрудников без ученой степени составляет 18 человек. Число молодых специалистов (моложе 39 лет) всего составляет 32 человека, в том числе научных сотрудников 13 человек.

Ученое звание профессора имеет 2 сотрудника. Ученое звание старшего научного сотрудника имеют 5 сотрудников, ученое звание доцента имеют 4 сотрудника. 5 сотрудников института являются экспертами РАН.

Сотрудники ПГИ состоят в следующих организациях:

Белаховский В.Б. член Американского геофизического союза (AGU), член Американского геофизического союза (EGU), эксперт РНФ

Воробьев В.Г. член редколлегии журнала «Геомагнетизм и аэрономия»

Демехов А. Г. является экспертом РАН в соответствии с распоряжением Президиума РАН от 27.07.2016 № 10108-509; член Американского геофизического союза (AGU), член Международного союза по наукам о радио (URSI) — член Российского национального комитета (РНК) URSI, председатель комиссии H (Waves in Plasmas) РНК, член COSPAR — член Российского национального комитета COSPAR, сопредседатель от IAGA совместной рабочей группы IAGA-URSI по зондированию ионосферы и магнитосферы с помощью КНЧ-ОНЧ волн (VERSIM).

Иванов В.Е. член государственной аттестационной комиссии МАГУ

Кириллов А.С. председатель государственной аттестационной комиссии МАГУ; является экспертом РАН в соответствии с распоряжением Президиума РАН от 27.07.2016 № 10108-509; член Американского геофизического союза (AGU)

Козелов Б. В. является экспертом РАН в соответствии с распоряжением Президиума РАН от 27.07.2016 № 10108-509; член редколлегии журнала «Космические исследования».

Сафаргалеев В.В. председатель государственной аттестационной комиссии МАГУ; член редколлегии журнала «Солнечно-Земная физика».

Шипилов Э. В. член редколлегии журнала РАН "Геотектоника"; зарегистрирован в федеральном реестре экспертов научно-технической сферы. Свидетельство № 06-01840 Минобрнауки РФ ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ от 18 июля 2012 г., обновлено от 31 июля 2015 г и действительно до 31.07.2018 г.; член Научного совета по проблемам тектоники и геодинамики ОНЗ РАН; является экспертом РАН в соответствии с распоряжением Президиума РАН от 27.07.2016 № 10108-509.

Яхнин А. Г. является экспертом РАН в соответствии с распоряжением Президиума РАН от 27.07.2016 № 10108-509.

4. Издательская деятельность

С 1994 года Институт регулярно издает сборник научных трудов ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений» (главный редактор – к.ф.-м.н. Любич А.А., изд-во ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН; ISSN 2588-0039). Издание входит в систему научного цитирования РИНЦ.

Каждый выпуск состоит из 7 разделов, охватывающих широкий спектр исследований:

1. Geomagnetic storms and substorms
2. Fields, currents, particles in the magnetosphere
3. Waves, wave-particle interaction
4. The sun, solar wind, cosmic rays
5. Ionosphere and upper atmosphere
6. Low atmosphere, ozone
7. Heliobiosphere.

В 2021 году силами сотрудников ПГИ были подготовлены следующие издания:

- «Физика авроральных явлений», сборник трудов -го ежегодного семинара, 15-19.03.2021, Апатиты. Изд. КНЦ РАН. ISSN 2588-0039, С.200. (45статей)
- «Физика авроральных явлений», 44-й ежегодный Апатитский семинар, 15-19.03.2021. Тезисы докладов", Препринт ПГИ-21-01-141, Изд-во КНЦ РАН, Апатиты, 2021, С. 81

- «Известия Российской академии наук. Серия физическая», тематический выпуск «Физика авроральных явлений», труды 44-го ежегодного семинара 15-19.03.2021, Апатиты. Издательство «Наука», Москва, №3, том 86, 2022 (Принят к публикации 22.11.2021).
- «PGI Geophysical data. October, November, December 2020» // Ed. V. Vorobjev. - Murmansk, Apatity: PGI RAS. -2021.
- «PGI Geophysical data. January, February, March 2021» // Ed. V. Vorobjev. -Murmansk, Apatity: PGI RAS. -2021.
- «PGI Geophysical data. April, May, June 2021» // Ed. V. Vorobjev. -Murmansk, Apatity: PGI RAS. -2021.
- «PGI Geophysical data. July, August, September 2021» // Ed. V. Vorobjev. -Murmansk, Apatity: PGI RAS. -2021.

5. Изобретательская деятельность

К числу важнейших практических разработок Института относятся две уникальные научные установки (УНУ):

1. УНУ «*Радиотомографическая установка (РТУ) Полярного геофизического института КНЦ РАН*» для исследования арктической и субарктической ионосферы методами спутниковой радиотомографии; Радиотомографическая установка ПГИ является единственной установкой такого типа в России. Подобные установки имеются в США и Великобритании. Однако, параметры УНУ, используемой в ПГИ, превосходят подобные установки по протяженности области исследований (полярная шапка – средние широты). Таким образом, на сегодняшний день РТУ ПГИ не имеет аналогов в мире. Установка состоит из семи территориально-разнесенных приемных станций, которые на когерентных частотах осуществляют регистрацию радиосигналов от низкоорбитальных навигационных спутников. Приемные станции РТУ оснащены системами дистанционного управления и системами сбора и передачи данных и работает автономно в непрерывном режиме. Преимущества установки: 1) получение экспериментальных данных о состоянии ионосферы в широком пространственном диапазоне от архипелага Шпицберген до средних широт; 2) высокое временное разрешение; 3) получение локальных (неинтегральных) распределений электронной плотности; 4) устойчивость к возмущениям в высоких широтах.
2. УНУ *Система регистрации космических лучей на нейтронных мониторах ПГИ*, расположенных в Апатитах и в Баренцбурге (Шпицберген) и входящих в глобальную сеть мониторинга космических лучей (КЛ). Россия имеет более десятка станций нейтронных мониторов (НМ) от Чукотки (ст. мыс Шмидта) до Апатитов и от Баренцбурга до Кавказа (ст. Баксан). ПГИ владеет двумя НМ (обс. Апатиты и Баренцбург). НМ 18NM64 в Апатитах находится в режиме непрерывного мониторинга с мая 1969 г. НМ в Баренцбурге обладает уникальным конусом приема, направленных в сторону северного полюса эклиптики. Все остальные станции имеют конусы приема, ориентированные далеко от полюса несмотря на географическое расположение. В Российской сети НМ это единственная станция. Аналогичная станция есть у США в Гренландии (Туле). Объединение всех российских НМ в единую сеть (прибор) позволяет получать непрерывную и достоверную информацию о потоках и вариациях космических лучей в северном полушарии. А также выполнять бесперебойный мониторинг солнечных космических лучей, которые характеризуются внезапным

появлением. Данная УНУ включена в мировую сеть мониторов, ведущих наблюдение за радиационной обстановкой в космосе: входит в тройку (вместе с Баксаном) мониторов с высокоточной (1 мс) привязкой, что позволяет исследовать синхронные быстропротекающие процессы на разнесенных до 3000 км мониторах.

На 31.12.2021 институт поддерживает в силе 6 патентов РФ на изобретение, 2 патента на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Патенты на изобретение:

1. *Всенаправленная кольцевая антенна с активным противовесом (№ 2707956)*. Авторы: Миличенко А.Н., Милкин В.И., Григорьев В.Ф., Полежаев В.С., Щепина Е.А.(ПГИ). Срок действия: 02.12.2019-02.04.2039.
2. *Синфазная горизонтальная диапазонная антенная система (№ 2593428)* Авторы: Милкин В.И., Лебедев В.Н., Калитенков Н.В., Шульженко А.Е., Григорьев В.Ф. (ПГИ; ФГБОУ ВПО «МГТУ»). Срок действия: 12.07.2016-13.04.2035.
3. *Способ обнаружения региональных зон повышенной трещиноватости и глубинных разломов литосферы (№ 2374666)* Авторы: Миличенко А.Н., Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф. (ПГИ). Срок действия: 27.11.2009-02.06.2028.
4. *Способ дальней радиосвязи с подводным объектом (№ 2440678)* Авторы: Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Милкин В.И., Калитенков Н.В. (ПГИ). Срок действия: 20.01.2012-28.12.2029.
5. *Перестраиваемая антенна НЧ, СВ, ВЧ диапазонов (№ 2757407)* Авторы: Милкин В.И., Козелов Б.В., Миличенко А.Н., Гурин А.В., Шульженко А.Е. (ПГИ; ФГБОУ ВПО «МГТУ»). Срок действия: 15.10.2021-26.01.2041
6. *Способ адаптивной радиосвязи повышенной надёжности с удаленными подвижными объектами СПМ (№2760981)* Авторы: Милкин В.И., Козелов Б.В., Миличенко А.Н., Гурин А.В., Шульженко А.Е. (ПГИ; ФГБОУ ВПО «МГТУ»). Срок действия: 02.12.2021-09.03.2041

Патенты на полезную модель:

1. *Устройство для исследования влияния искусственного электромагнитного поля на водные биологические объекты (№ 166414)* Авторы: Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф. (ПГИ). Срок действия: 07.11.2016-22.06.2026.
2. *Система беспроводной аварийно-вызывной шахтной сигнализации и связи на экстремально низких частотах (№ 130346)* Авторы: Миличенко А.Н., Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Милкин В.И. (ПГИ). Срок действия: 01.04.2013-01.04.2023.

Свидетельства о государственной регистрации программы ЭВМ:

1. *Программа расчета динамических спектров параметров электромагнитных волн по данным спутников Van Allen Probes (№ 2017613890)* Автор: Ларченко А.В. (ПГИ). Срок действия: 19.01.2017-01.04.2030.
2. *Программно-исследовательский комплекс построения высотных профилей скорости ионизации атмосферы, обусловленных выпадающими потоками авроральных электронов и протонов (№ 2016619707)* Авторы: Гомонов А.Д., Осепян А.П., Черняков С.М., Юрик Р.Ю. (ПГИ; ФГБОУ ВПО «МГТУ»).

6. Организация научных совещаний и конференций

С 15 по 19 марта 2021 г. прошел 44-й Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», ежегодно организуемый Полярным геофизическим институтом (г. Апатиты). В силу ограничений, обусловленных пандемией COVID-19, семинар был проведён в режиме онлайн. В нём приняли активное участие более ста человек. В их числе были 50 ученых из других

учреждений и городов России (Москвы, Санкт-Петербурга, Калининграда, Иркутска, Нижнего Новгорода, Якутска). Не менее половины участников, как обычно, были молодыми учеными. В семинаре участвовали представители 6 российских университетов и 14 научно-исследовательских институтов. Среди докладчиков были также одиннадцать представителей зарубежных исследовательских институтов (из Аргентины, Болгарии, Индии, США, Чехии, Японии). Несколько иностранных ученых (из Бразилии, Индии, Нигерии, Малайзии, Финляндии) участвовали в семинаре как слушатели. Такое широкое международное представительство стало возможным благодаря онлайн формату проведения конференции, информация о которой была помещена в новостном бюллетене SCOSTEP.

На семинаре были представлены 67 устных и 58 стендовых докладов. Семинар был посвящен обсуждению новейших результатов, полученных российскими и иностранными учеными в области исследования геофизических процессов, наиболее интенсивно проявляющихся на широтах авроральной и субавроральной зон.

Работа семинара традиционно проходила по следующим направлениям:

- Бури и суббури;
- Поля, токи, частицы в магнитосфере;
- Волны, взаимодействие волна-частица;
- Солнце, солнечный ветер, космические лучи;
- Ионосфера и верхняя атмосфера;
- Нижняя атмосфера, озон;
- Гелиобиосфера.



Рис. 70. Screenshot экрана во время открытия семинара 44-го Апатитского семинара.

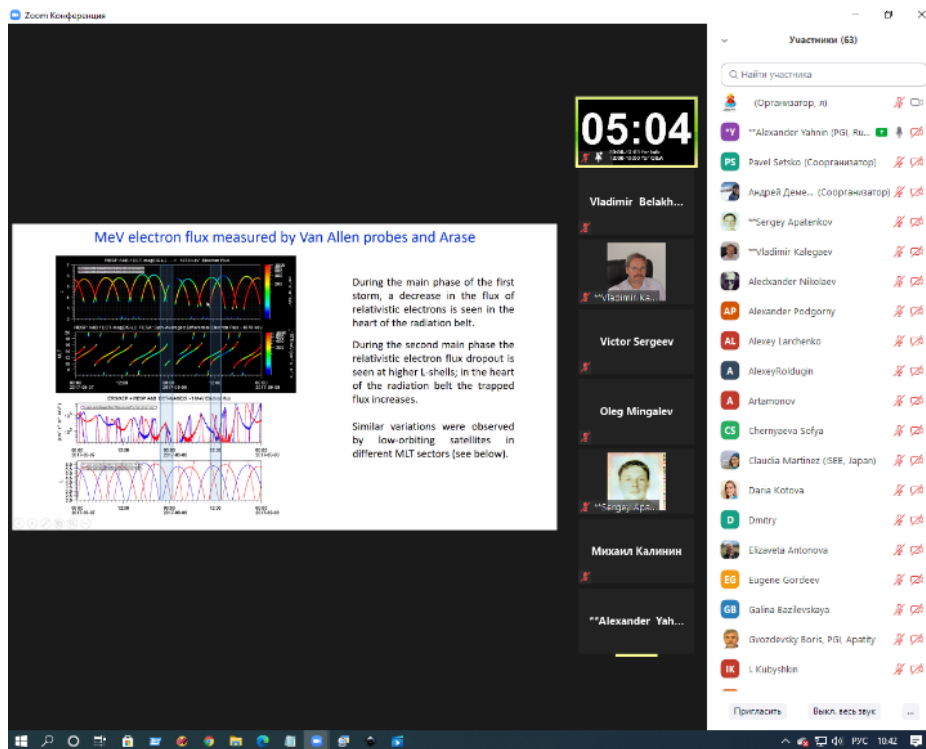


Рис. 71. Screenshot экрана во время дистанционного представления доклада к.ф.-м.н. А.Г. Яхниным на Апатитском семинаре

По итогам Семинара изданы сборник трудов и тезисы докладов «Физика авроральных явлений». Наиболее интересные работы поданы в научный журнал «Известия Российской академии наук. Серия физическая» для публикации тематического выпуска «Физика авроральных явлений». Статьи приняты в печать.

Организация семинара была поддержана грантом международной программы SCOSTEP/PRESTO.

В связи с запретом проведения массовых мероприятий и принятием карантинных мер были перенесены на 2022 год несколько проводимых ежегодно конференций.

В Апатитах:

- Ежегодный семинар-школа "Полярные процессы в атмосферах планет

В Мурманске:

- 19-я международная научная конференция студентов и аспирантов "Проблемы Арктического региона"

Перенесены на 2022 год запланированные мероприятия (вторая зимняя школа для аспирантов и студентов в г.Тромсе, Норвегия) международного проекта ASTRA, активным участником которого является ПГИ. Проект направлен на научную подготовку молодого поколения ученых-геофизиков, чья деятельность будет связана с исследованиями Арктики.

7. Образовательная деятельность

В институте имеется базовая научно-учебная кафедра Экспериментальной физики Мурманского государственного арктического университета (МАГУ). В 2021 г. выпуска студентов не было. Сотрудники института ведут занятия по 5 предметам, руководят дипломными и курсовыми работами и прохождением производственной практики студентов.

Пять сотрудников ПГИ входят в состав трех госкомиссий по приему государственных экзаменов и защите дипломов МАГУ, являясь председателями двух из них.

8. Участие в популяризации естественнонаучных знаний

Одним из важнейших направлений деятельности является популяризация научных знаний для пользователей, не являющихся специалистами в тематике исследований Института. В настоящее время Север является местом активного туризма. Продолжается активное сотрудничество института и телерадиокомпании ГТРК «Мурман». В СМИ была освящена реализация проекта «Система мониторинга северного сияния для нужд туристического бизнеса» по программе «Коларктик 2014-2020». Всего в проекте 5 партнеров, среди которых лидирующий – Полярный геофизический институт.

В марте 2021 вышел сюжет «Мониторинг северных сияний для нужд туризма» о новом международном проекте.

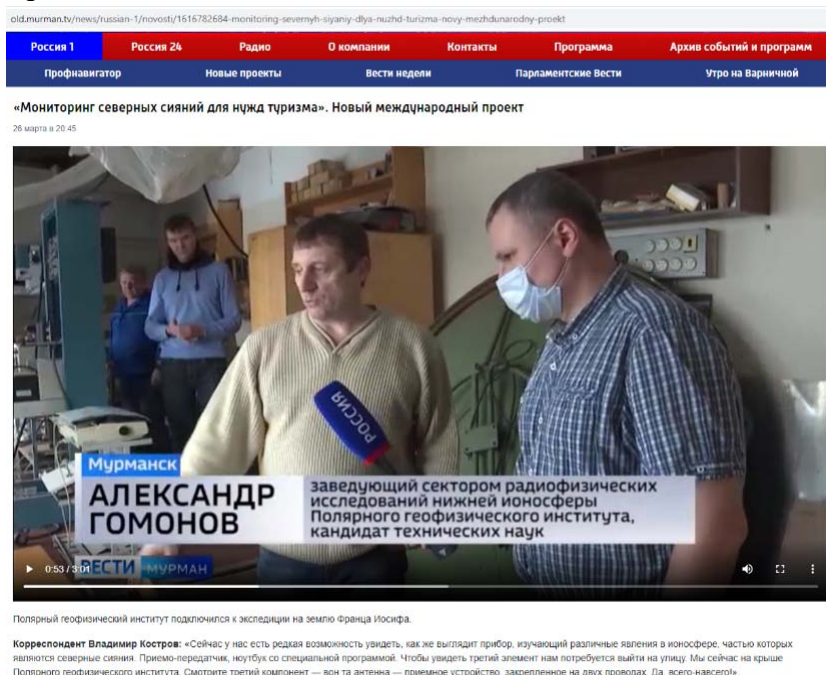


Рис.72. Корреспондент ГТРК «Мурман» берет интервью у Гомонова А.Д.

Несколько сюжетов посвящены совместной работе ученых ПГИ и специалистов заповедник «Пасвик»:

- С этого года каждый желающий сможет наблюдать уникальное природное явление с любой точки мира. В августе вместе с представителями института сотрудники ПГИ установили на крыше экологической школы Пасвика в Раякоски авроральную камеру, которая поможет наблюдать за природными явлениями Севера в течение всего года и при любой погоде. Ведь помимо северного сияния, можно увидеть светящиеся столбы и жемчужные облака.

Мы первые из партнеров, у кого была установлена эта камера, далее на очереди Норвегия и Финляндия. Совсем скоро наблюдать трансляцию явлений станет возможным на нашем официальном сайте. Камера подключена к интернету, изображение обновляется каждые 10 секунд, что в будущем позволит создавать видео сияний.

Заместитель директора Полярного геофизического института по международному сотрудничеству Елена Скиотис: «Эти камеры будут использоваться и для образовательных программ, для школьников и студентов, которые проживают в этих местностях, для того, чтобы они лучше знали природу той местности, где они живут».



Рис.73. Специалисты ПГИ и заповедника «Пасвик»

- 20-21 октября была организована рабочая поездка участников проекта в Раякоски для встречи с коллегами, проверки работы камеры, а также проведения эколого-просветительских мероприятий для детей разных возрастов в школе поселка.

Елена Ионасовна Скиотис – координатор проекта со стороны Полярного геофизического института – провела занятие для учащихся начальной школы, где в игровой форме ребята узнали о закономерностях возникновения такого природного феномена, как полярные сияния.



Рис. 74. Б.В. Козелов проводит лекцию для старшеклассников

Просветительская деятельность проходит как на общие темы, так и про конкретные явления:

- В среду 31 марта 2021 года директор ПГИ Борис Владимирович Козелов и заведующий лабораторией Ярослав Алексеевич Сахаров приняли участие в съемке первого выпуска программы ГТРК «Мурман» «Утро на Варничной». Ведущий и журналист региональной телерадиокомпании Владимир Костров пригласил наших коллег для участия в познавательной и интересной беседе о том, что является предметом изучения Геофизики, о природе полярных сияний, о том, как процессы, происходящие в космосе, влияют на жизнь и благополучие человека.



Рис.75. Б.В. Козелов и Я.А. Сахаров в студии ГТРК «Мурман»

- Заведующий лабораторией геофизических наблюдений Ярослав Сахаров рассказал ГТРК “Мурман” о солнечном затмении 10 июня 2021 года.



Рис. 76. Дистанционное интервью с Я.А. Сахаровым о солнечном затмении

Во время командировки на архипелаг Шпицберген в октябре 2021 года сотрудники Полярного геофизического института Ю.В. Балабин и А.В. Ролдугин провели несколько образовательных лекций для сотрудников АНИИ, Гидрометеорологической обсерватории, сотрудников Генерального Консульства, учащихся и преподавателей общеобразовательной школы п. Баренцбург. Тематика лекций включала информацию о проведении оптических наблюдений, физике авроральных явлений, измерениях космических лучей в полярных



широтах, а также о значимости уникальных приборов, размещенных в п. Баренцбург, для проведения фундаментальных научных исследований.

Рис.77. Ю.В. Балабин читает лекцию на архипелаге Шпицберген

Сотрудники ПГИ активно участвуют в мероприятиях, объединяющих на одной площадке представителей власти, науки и бизнеса для обсуждения вопросов развития и освоения Арктического региона:

- 24 ноября 2021 представители ПГИ приняли участие в IV международной сессии «Сотрудничество в Арктике», на которой губернатор Мурманской области Андрей Чибис представил обновленный стратегический план «На Севере – жить! 2.0». Большая часть выступления губернатора была посвящена представлению важнейшие федеральные проекты, в реализации которых участвует Мурманская область, – «Гектар Арктики», создание на базе Севморпути нового глобального транспортного коридора, а также уникальный проект магистральной подводной волоконно-оптической связи Мурманск – Владивосток.

Повестка мероприятия включала в себя широкий спектр вопросов, посвященных проблемам и перспективам развития Арктической зоны, в том числе в контексте председательства в Арктическом совете.

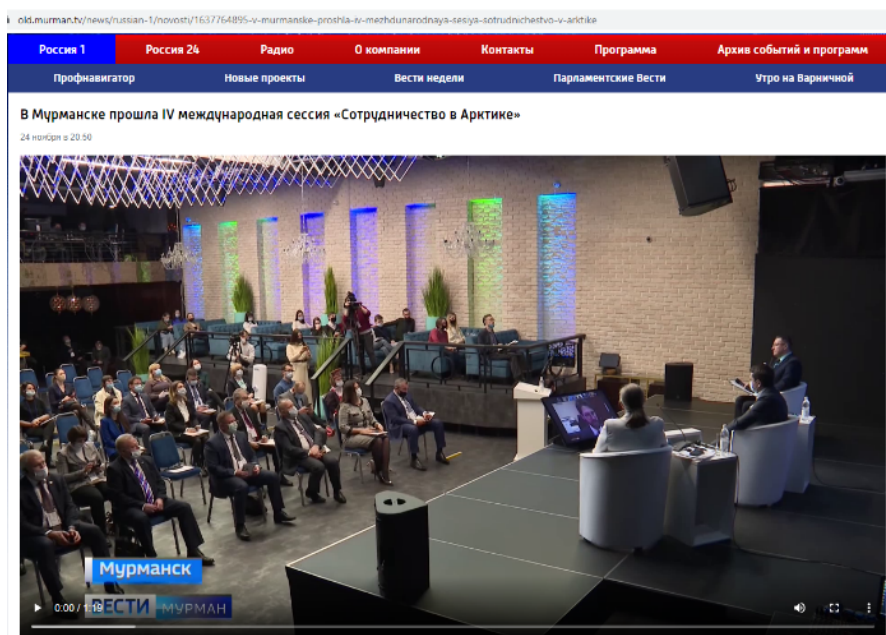


Рис.78. Зал заседаний IV международной сессии «Сотрудничество в Арктике»

- 2 декабря 2021 года, начал свою работу XI Международный форум «Арктика: настоящее и будущее», который на одной площадке объединил представителей власти, науки и бизнеса для обсуждения вопросов развития и освоения Арктического региона.

Безусловный интерес с точки зрения анализа основных направлений, проблем и перспектив научных исследований в Арктике представляет панельная сессия «Фундаментальная и прикладная наука для нужд Арктики». Повестка сессии включает такие проблемы как развитие материально-технической базы для исследований в Арктике, поддержка научных исследований по арктической тематике и международное сотрудничество в Арктике.



Рис.79. Работа XI Международного форума «Арктика: настоящее и будущее»

Сотрудники ПГИ продолжают проводить лекции для школьников:

- 15 декабря 2021 года старший научный сотрудник ПГИ, к.ф.-м.н. Белаховский Владимир Борисович по приглашению Министерства образования и науки Мурманской области, в рамках акции «На острие науки», проводимой в Год науки и технологий, провел лекцию для учащихся 11-го класса гимназии №1 г. Апатиты на тему: «Что такое космическая погода и зачем ее исследовать?».



Рис.80. В.Б. Белаховский читает лекцию учащимся 11-го класса

- 17 декабря 2021 года заведующий лабораторией геофизических наблюдений, к.ф.-м.н. Сахаров Ярослав Алексеевич провел лекцию для учеников 3-го класса школы №15 г. Апатиты на тему: «Космическая погода в высоких широтах».

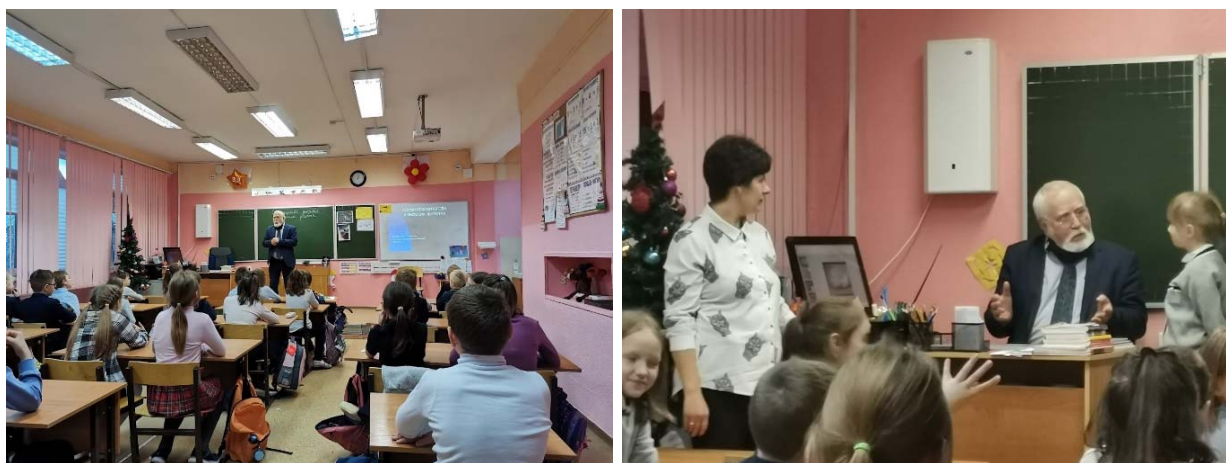


Рис.81. Я.А. Сахаров читает лекцию и отвечает на вопросы учеников 3-го класса

Все актуальные новости о деятельности института находятся в открытом доступе на сайте <http://pgia.ru/lang/ru/news>.

БИБЛИОГРАФИЯ РАБОТ ИНСТИТУТА

Зарубежные публикации

1. Sugo, S., Kawashima, O., Kasahara, S., Asamura, K., Nomura, R., Miyoshi, Y., Y. Ogawa, K. Hosokawa, T. Mitani, T. Namekawa, T. Sakanoi, M. Fukizawa, N. Yagi, Y. Fedorenko, A. Nikitenko, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, C. Koehler. Energy-resolved detection of precipitating electrons of 30–100 keV by a sounding rocket associated with dayside chorus waves // *JGR Space Physics*, 126, e2020JA028477. <https://doi.org/10.1029/2020JA028477>
2. Manninen J., Kleimenova N., Turunen T., Nikitenko A., Gromova L., Fedorenko Yu. New Type of Short High-Frequency VLF Patches (“VLF Birds”) Above 4–5 kHz // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, V. 126, Issue 4, 2021, № e2020JA028601. <https://doi.org/10.1029/2020JA028601>
3. Namekawa, T., Mitani, T., Asamura, K., Miyoshi, Y., Hosokawa, K., Ogawa, Y., S. Saito, T. Hori, S. Sugo, O. Kawashima, S. Kasahara, R. Nomura, N. Yagi, M. Fukizawa, T. Sakanoi, Y. Saito, A. Matsuoka, I. Shinohara, Y. Fedorenko, A. Nikitenko, C. Koehler. Rocket observation of sub-relativistic electrons in the quiet dayside auroral ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028633. <https://doi.org/10.1029/2020JA028633>
4. Yahnin, A. G., Popova, T. A., Demekhov, A. G., Lubchich, A. A., Matsuoka, A., Asamura, K., et al. Evening side EMIC waves and related proton precipitation induced by a substorm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. V. 126. Issue 7, e2020JA029091, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JA029091>. 2021
5. Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. The Kinetics of O2 Singlet Electronic States in the Upper and Middle Atmosphere During Energetic Electron Precipitation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v.126, №5, e2020JD033177, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JD033177>
6. Demekhov A.G., Titova E.E., Manninen J., Nikitenko A.S., Pilgaev S.V. Short periodic vlf emissions observed simultaneously by van allen probes and on the ground // *Geophysical Research Letters*, 2021, том 48, № 20, <https://doi.org/10.1029/2021GL095476>
7. Kirpichev I. P., Antonova E. E., Stepanova M., Eyelade A. V., Espinoza C. M., Ovchinnikov I. L., Vorobjev V. G., Yagodkina O. I. Ion Kappa Distribution Parameters in the Magnetosphere of the Earth at Geocentric Distances Smaller Than 20 RE During Quiet Geomagnetic Conditions // *J. Geophys. Res.* 17 September 2021. No. 10. DOI:10.1029/2021JA029409. 2021
8. Artemyev A.V., Demekhov A.G., Zhang X.-J., Angelopoulos V., Mourenas D., Fedorenko Yu V., J. Maninnen, E. Tsai, C. Wilkins, S. Kasahara, Y. Miyoshi, A. Matsuoka, Y. Kasahara, T. Mitani, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, S. Matsuda, S. Nakamura, M. Kitahara, T. Takashima, I. Shinohara. Role of Ducting in Relativistic Electron Loss by Whistler-Mode Wave Scattering // *JGR Space Physics*, Volume 126, Issue 11, 20 October 2021, <https://doi.org/10.1029/2021JA029851>
9. Zhang X.-J., Demekhov A. G., Katoh Y., Nunn D., Tao X., Mourenas D., Omura Y., Artemyev A. V., Angelopoulos V. Fine Structure of Chorus Wave Packets: Comparison Between Observations and Wave Generation Models // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2021. — V.126, No.8. e2021JA029330. <https://doi.org/10.1029/e2021JA029330>

10. Chinkin V.E., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Sakharov Ya.A. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 212, January 2021, 105514, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514>
11. Ugolnikov O.S., Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Roldugin A.V. Retrieval of particle size distribution of polar stratospheric clouds based on Wide-Angle Color and Polarization Analysis // *Planetary and Space Science*, Volume 200, June 2021, 105213, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105213>
12. Yagova N.V., Pilipenko V.A., Sakharov Y.A., Selivanov, V.N. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents // *Earth, Planets and Space*, Volume 73, Issue 1, article id. 88. 2021. DOI: 10.1186/s40623-021-01407-2
13. Grach V.S., Demekhov A.G., Larchenko A.V. Resonant interaction of relativistic electrons with realistic electromagnetic ion-cyclotron wave packets // *Earth Planets Space* 73, 129 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01453-w>
14. Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes // *Ann. Geophys.*, 39, 687–700, <https://doi.org/10.5194/angeo-39-687-2021>, 2021.

Публикации в российских рецензируемых журналах

1. Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Распространение электромагнитных волн в области высоких широт при различном состоянии ионосферы на частотах системы радионавигации РСДН-20 (Альфа) // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2021, Т. 61, № 3, стр. 366-378, DOI: 10.31857/S0016794021030020
2. Мингалев И.В., Суворова З.В., Шубин В.Н., Мерзлый А.М., Тихонов В.В., Талалаев А.Б., Мингалев В.С. Отличия прогнозов условий кв-радиосвязи между передатчиком на средних широтах и приемником в арктическом регионе при использовании различных эмпирических моделей ионосферы // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2021, Т. 61, № 4, стр. 506-519, DOI: 10.31857/S001679402104009X
3. Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Свечение молекулярного азота и молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных протонов // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 61. № 6. С. 769–776. 2021.
4. Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объемной интенсивности свечения // *Космические исследования*, 2021, том 59, No 4, с. 267–274
5. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 2. Энергетические спектры высыпающихся электронов // *Космические исследования*, 2021, том 59, No 5, с. 355–360.
6. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И. и др. Приземная концентрация озона на территории России во втором полугодии 2020 г. // *Оптика атмосферы и океана*, 2021, №4, с.292-301. Doi: 10.15372/AOO20210407

7. Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Направленный детектор нейтронов умеренных энергий // Приборы и техника эксперимента. № 4, 2021, С. 89-94
8. Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В., Филатов М.В., Никитенко А.С. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к Мировому Времени // Приборы и техника эксперимента. №5. С.115-125. 2021. DOI: 10.31857/S0032816221040248
9. Tereshchenko E.D., Tereshchenko P.E. Influence of Layering of the Lithosphere on Excitation of Extremely Low-Frequency Electromagnetic Waves by a Horizontal Dipole // Journal of Communications Technology and Electronicsthis, 2021, 66(4), стр. 397–402
10. Tereshchenko E.D., Tereshchenko P.E. Quasi-Stationary Approximation in the Problem of Excitation of Low-Frequency Electromagnetic Fields in Lithosphere // Technical Physicsthis, 2021, 66(1), стр. 77–83 402
11. Шипилов Э. В., Лобковский Л. И., Шкарубо С. И., Кириллова Т. А. Геодинамические обстановки в зоне сопряжения хребта Ломоносова и Евразийского бассейна с континентальной окраиной Евразии // Геотектоника. – 2021. – № 5. – С. 3-26. DOI: 10.31857/S0016853X21050076
12. Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Распространение электромагнитных волн в области высоких широт при различном состоянии ионосферы на частотах системы точного времени “БЕТА” // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 315-320. DOI: 10.31857/S0367676521020034
13. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Моделирование спектра свечения ночного неба земли для систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями молекулы электронно-возбужденного кислорода // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 310-314. DOI: 10.31857/S0367676521020046
14. Балабин Ю.В., Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г., Янковский И.В. О вариациях потока космических лучей в конце 24 цикла солнечной активности // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.321-325. DOI: 10.31857/S0367676521030030
15. Балабин Ю.В., Луковникова А.А., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А., Янковский И.В. Исследование событий множественности на высокогорном нейтронном мониторе // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т.85. № 5. С.757–760. DOI: 10.31857/S0367676521030042
16. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ревунова Е.А. Исследование статистической связи корональных выбросов массы с солнечными вспышками // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.326-330. DOI: 10.31857/S0367676521030054
17. Бархатова О.М., Воробьев В.Г., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. УНЧ возмущения, вызванные турбулентной оболочкой межпланетных магнитных облаков // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.331-335. DOI: 10.31857/S0367676521030066
18. Черняков С.М., Турянский В.А. Использование метода частичных отражений для определения мезосферной температуры // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 428-432. DOI: 10.31857/S0367676521030078

19. Демин В.И., Козелов Б.В. Влияние микроклимата на температуру искусственных поверхностей // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.341-345. DOI: 10.31857/S0367676521030091
20. Дэспирак И.В., Любчик А.А., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М. Долготные геомагнитные эффекты суперсуббурь во время магнитной бури 9 марта 2012 г. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.346-352. DOI: 10.31857/S0367676521030108
21. Кириллов А.С., Вернер Р., Гинева В. Моделирование колебательных населенностей состояний герцберга молекулярного кислорода в средней атмосфере земли во время высыпания высокоэнергичных частиц // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.361-365. DOI: 10.31857/S0367676521030121
22. Козелов Б.В., Ролдугин А.В. Получение информации об ионосферно-магнитосферной плазме по наблюдениям полярных сияний // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.366-371. DOI: 10.31857/S0367676521030157
23. Любчик В.А. Исследование строения литосферы высокоширотных районов западно-арктической континентальной окраины по результатам эксперимента FENICS-2019 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.378-382. DOI: 10.31857/S0367676521030169
24. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Моделирование прохождения протонов солнечных космических лучей через атмосферу земли для событий GLE42 и GLE44 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.383-387. DOI: 10.31857/S0367676521030170
25. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б. Расчет скорости ионизации во время события GLE с использованием глобальной модели атмосферы земли и оценка вклада в этот процесс частиц галактических космических лучей с $Z > 2$ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.388-392. DOI: 10.31857/S0367676521030182
26. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Федотова Е.А. Учет нарушения локального термодинамического равновесия в верхней атмосфере Земли в колебательных полосах молекул углекислого газа в радиационном блоке модели общей циркуляции атмосферы Земли // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 393-397. DOI: 10.31857/S0367676521030194
27. Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 398-403. DOI: 10.31857/S0367676521030200
28. Попова Т.А., Демехов А.Г., Яхнин А.Г. Протонные высыпания и электромагнитные ионно-циклотронные волны, обусловленные суббуревой инжекцией // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 404-409. DOI: 10.31857/S0367676521030212
29. Романова Н.Ю. Влияние горизонтального ветра на ориентацию поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы (по данным г. Москва) // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 410-415. DOI: 10.31857/S0367676521030224

30. Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. Геомагнитные пульсации PC5/PI3 и геоиндуцированные токи // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 445-450. DOI: 10.31857/S0367676521030236
31. Селиванов В.Н., Сахаров Я.А. Влияние геоиндуктированных токов на содержание гармоник в силовых трансформаторах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 416-421. DOI: 10.31857/S0367676521030248
32. Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И., Захаренкова И.Е., Тепеницына Н.Ю. Флуктуации полного электронного содержания и ошибки GPS позиционирования, обусловленные полярными сияниями во время аврорального возмущения 27 сентября 2019 года // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 433-439. DOI: 10.31857/S036767652103025X
33. Сотников Н.В., Антонова Е.Е., Овчинников И.Л., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Пулинец М.С. Формирование внешнего радиационного пояса во время геомагнитных бурь и адиабатический механизм падения и возрастания потоков релятивистских электронов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 422-427. DOI: 10.31857/S0367676521030297
34. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Давление ионов в области высыпаний дневного низкоширотного граничного слоя // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.336-340. DOI: 10.31857/S0367676521030315
35. Яхнина Т.А., Яхнин А.Г., Райта Т., Маннинен Ю., Голдстейн Дж. Локализация источников геомагнитных пульсаций PC1 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 451-456. DOI: 10.31857/S0367676521030327
36. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Расчет прохождения солнечных космических лучей через атмосферу Земли для события GLE № 69 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т.85. № 8. С.1198-1200. DOI: 10.31857/S0367676521080184
37. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Борисенко А.В., Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Мешалкина Н.С., Гвоздевский Б.Б. Изучение механизма ускорения космических лучей во время солнечных вспышек электрическим полем в токовом слое солнечной короны // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т.85. № 8. С.1194–1197. DOI: 10.31857/S0367676521080226
38. Балабин Ю.В. Поиск оптимальных точек размещения портативного нейтронного монитора // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т.85. № 11. С.1634–1636. DOI: 10.31857/S0367676521110053
39. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Компактные счетчики заряженной компоненты как дополнительное средство верификации моделирования прохождения космических лучей через атмосферу Земли // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т.85. № 11. С.1634-1636. DOI: 10.31857/S0367676521110235
40. Давыдов В. Е., Зинкина М. Д., Писанко Ю. В., Тертышников А.В., Юрик Р.Ю. Спутниковые наблюдения эффектов от нагрева авроральной ионосферы комплексом EISCAT // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 4. – С. 37-42. – DOI 10.52002/0130-2906-2021-4-37-42
41. Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Мерзлый А.М. Силовой баланс в токовых слоях в бесстолкновительной плазме // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 2. С. 3–12. DOI: 10.12737/szf-71202101

42. Shipilov, E.V., Lobkovsky, L.I., Shkarubo, S.I. The nature of regional magnetic anomalies in the northeast of the barents-kara continental margin based on the results of seismic data interpretation // *Arktika: Ekologia i Ekonomika*, V. 11, Issue 2, p. 195-204, 2021. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-195-204>
43. Б.Н. Четверушкин, И.В. Мингалев, В.М. Чечеткин, К.Г. Орлов, Е.А. Федотова, В.С.Мингалев, О.В. Мингалев. Модели общей циркуляции атмосферы земли. Достижения и направления развития // *Математическое моделирование*, 2020, Т. 32, № 11, С.29-46. DOI: 10.20948/mm-2020-11-03 (не вошла в прошлогодний отчет)

Публикации в трудах международных конференций

1. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Щур Л.И., Ларченко А.В. Наблюдение возрастания гамма-излучения при осадках во время морской экспедиции // в сборнике: *Климатические риски и космическая погода. Материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой*. Иркутск, 2021. С. 30-35.
2. Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Влияние высокоэнергичных протонов на кинетику молекулярных азота и кислорода в средней атмосфере земли // в сборнике: *Климатические риски и космическая погода. Материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой*. Иркутск, 2021. С. 48-53.
3. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Компактные счетчики заряженной компоненты как дополнительное средство верификации моделирования прохождения космических лучей через атмосферу земли // в сборнике: *Климатические риски и космическая погода. Материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой*. Иркутск, 2021. С. 54-59.
4. Кириллов А.С., Белаховский В.Б. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Влияние высокоэнергичных протонов на кинетику молекулярных азота и кислорода в средней атмосфере Земли. // *Материалы международной конференции «Климатические риски и космическая погода»*, ISBN 978-5-9624-1956-5, Иркутск, 14-17 июня 2021 г., с.48-53. doi: 10.26516/978-5-9624-1956-5.2021.1-381.
5. Telegin V.A., Romanova N.Yu., Zhbankov G.A., Maltseva O.A., Panchenko V.A. Investigation of the small-scale irregularities in F-region of the mid-latitude ionosphere by radioprobing and radiolocation // *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, Divnomorskoye, Russia, June 28 - July 2 2021*. doi: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494052
6. Kleimenova N.G., Despirak I.V., Malysheva L.M., Gromova L.I., Lubchich A.A. Polar substorm, Svalbard auroras and mid-latitude positive magnetic bays: case study // *Proceedings of Thirteenth Workshop "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere"*, Primorsko, Bulgaria, 12-18 September 2021 Book of Proceedings.pdf, p. 141-146, DOI: 10.31401/WS.2021.proc
7. Werner R., Guineva V., Atanassov A., Bojilova R., Raykova L., Valev D., Lubchich A., Despirak I. Calculation of the horizontal power perturbations of the Earth surface magnetic field // *Proceedings of Thirteenth Workshop "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere"*, Primorsko, Bulgaria, 12-18 September 2021 Book of Proceedings.pdf, p. 159-164, DOI: 10.31401/WS.2021.proc

8. Veneta Guineva, Rolf Werner, Atanas Atanassov, Rumiana Bojilova, Lyubomira Raykova, Dimitar Valev, Irina Despirak, Nataliya Kleimenova. Construction of a catalog of the magnetic variations by data of the Bulgarian station Panagjurishte // Proceedings of Seventeenth international scientific conference “Space, Ecology, Safety” ISSN 2603-3321. – 20-22 October 2021, Sofia, Bulgaria. 2021, P 39-44.
9. Rolf Werner, Veneta Guineva, Andris Lubchich, Irina Despirak, Rumiana Bojilova, Dimitar Valev, Atanas Atanassov, Lyubomira Raykova. Determination of power perturbations of the horizontal magnetic field on the Earth surface // Proceedings of Seventeenth international scientific conference “Space, Ecology, Safety” ISSN 2603-3321. – 20-22 October 2021, Sofia, Bulgaria. 2021, P 34-38.
10. Шпилов Э.В. Идентификация Хатангско-Ломоносовской зоны разломов по комплексу разнородных геолого-геофизических данных // доклад на XXIV Международной Научной конференции (Школе) по морской геологии, г. Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 15-19 ноября 2021 г.

Публикации в трудах российских конференций

1. E.E. Antonova, N.V. Sotnikov, V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina, I.P. Kirpichev, I.L. Ovchinnikov, M.S. Pulinets, M.V. Stepanova Problems of the outer radiation belt formation and topological features of high latitude magnetosphere // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
2. I.V. Despirak, N.G. Kleimenova, A.A. Lubchich, P.V. Setsko, R. Werner Supersubstorm on 28 May 2011 – geomagnetic effects in the global scale // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», pp.17-19, Apatity, 2021.
3. I.V. Despirak, T.V. Kozelova, B.V. Kozelov, A.A. Lubchich Observations of substorm activity from the data of MAIN camera system and THD satellite in the plasma sheet // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
4. I.V. Despirak, P.V. Setsko, Ya.A. Sakharov, V.N. Selivanov GICs in the main transmission line “Northern Transit” in Russia and in the Mantsala Finland pipeline: a case study // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», pp.24-27, Apatity, 2021.
5. I.I. Efimov, I.I. Shagimuratov, I.E. Zakharenkova, N.Yu. Tepenitsyna, M.V. Filatov, G.A. Yakimova. Day by day behavior of GNSS positioning errors and TEC fluctuations associated auroral disturbances over March 2015 // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
6. V. Guineva, I. Despirak, R. Werner, R. Bojilova, L. Raykova Study of mid-latitude positive bays during substorms over Scandinavia – A case study // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
7. Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, Е.А. Ревунова, О.И. Ягодкина, И.С. Ундалова. Нейросетевая классификация причинно-следственной связи суббуревой активности с параметрами магнитных облаков солнечного ветра // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
8. А.А. Любчич, И.В. Дэспирак, Н.Г. Клейменова, Р. Вернер. Суперсуббурия 20 декабря 2015 года: магнитные эффекты на разных широтах // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.

9. В.А. Пархомов, В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич, Б. Цэгмэд, С.Ю. Хомутов, Р.А. Рахматулин, Т. Райта, А.А. Мочалов, С.В. Пильгаев. Глобальная изолированная суббурия, вызванная диамагнитной структурой медленного солнечного ветра 22.12.2015 // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
10. С.Е. Ревунов, В.Г. Воробьев, О.М. Бархатова, О.И. Ягодкина, А.А. Зуборева. Нейросетевой анализ особенностей генерации высокоширотных геомагнитных возмущений, вызываемых оболочками магнитных облаков солнечного ветра // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
11. И.И. Шагимуратов, И.И. Ефишов, М.В. Филатов, И.Е. Захаренкова, Н.Ю. Тепенитчина, Г.А. Якимова. Флуктуации GPS-сигналов и ошибки позиционирования в полярной и авроральной ионосфере в ноябре 2012 года // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
12. В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина, Е.Е. Антонова, И.П. Кирпичев Давление ионов в ночной авроральной зоне при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
13. V.V. Belakhovsky, V.A. Pilipenko, K. Shiokawa, Y. Miyoshi. The investigation of the Pg pulsations with using data of ARASE, GOES satellites and ground-based stations // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. - P.63-66. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.014
14. О.И. Ахметов, И.В. Мингалев, О.В. Мингалев, В.Б. Белаховский, З.В. Суворова. Моделирование процесса распространения сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» в участках волновода Земля – ионосфера с горизонтально неоднородным распределением концентрации электронов // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. - P.67-70. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.015
15. В.А. Любчик. Трехмерное моделирование процесса распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона от контролируемого источника в высокоширотных районах Западно-Арктической континентальной окраины на примере полуостровов Рыбачий и Средний // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. – С. 71-74. DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.016
16. А.С. Никитенко, М.В. Кузнецова, Ю.В. Федоренко, Ю. Маннинен, Н.Г. Клейменова, С.В. Пильгаев, А.В. Ларченко Ионосферная область рассеяния ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в высоких широтах // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
17. Zh.V. Dashkevich, V.E. Ivanov, B.V. Kozelov The features of precipitating electron spectra in the rayed auroras // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
18. A.S. Kirillov, R. Werner, V. Guineva The simulation of vibrational populations of electronically excited N₂ in Titan's upper atmosphere during precipitations of high-energetic particles // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. - P.122-125. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.028
19. V. Safargaleev, T. Sergienko, K. Hosokawa, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, S.-I. Oyama, S. Kurita, R. Fujii On the possible origin of internal (2-3 Hz) modulation of pulsating auroras // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.

20. С.В. Пильгаев, Б.В. Козелов, М.В. Филатов, Ю.В. Федоренко, А.В. Ларченко, А.В. Ролдугин, П.А. Будников О возможности исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций по оптическим и GNSS данным // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
21. О.И. Ягодкина, В.А. Панченко, В.Г. Воробьев, В.А. Телегин, Г.А. Жбанков Влияние магнитной активности и давления солнечного ветра на среднеширотную ионосферу во время магнитной бури 22-23 июня 2015 года // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021.
22. Y.Y. Kulikov, A.F. Andriyanov, V.G. Ryskin, V.M. Demkin, V.I. Demin, A.S. Kirillov, V.A. Shishaev The microwave monitoring of the middle atmosphere ozone on Kola Peninsula during last three winters // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. - P.168-171. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.039
23. О.В. Антоненко, А.С. Кириллов Анализ излучаемых полос Чемберлена и Герцберга I в спектре свечения ночного неба Земли // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. - P.172-175. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.040
24. В.И. Демин, Б.В. Козелов, А.В. Лосев. Особенности вертикального распределения температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в прибрежных и центральных районах Мурманской области // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. - P.176-180. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.041
25. В.И. Демин, Б.В. Козелов, Т.А. Муравьева Связь вертикального распределения температуры воздуха в Хибинах с температурой над предгорной равниной // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2021. - P.181-185. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.042
26. А.С. Кириллов, В.Б. Белаховский, Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздецкий Исследование кинетики основных атмосферных составляющих во время высыпания высокоэнергичных протонов в среднюю атмосферу Земли // Proc. 44th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», 15-19 March 2020. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.186-190. doi: 10.51981.2588-0039.2021.44.043
27. А.Д. Гомонов, Р.Ю. Юрик, Ю.А. Шповалова, Н.В. Иванов Сравнение модельных данных IRI-2016 с экспериментальными измерениями электронных концентраций в D-области ионосферы по сезонам 2017 года // XXVII ВСЕРОССИЙСКАЯ ОТКРЫТАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН» (РРВ'2021) 28 июня – 3 июля 2021, Калининград, Россия, ст.247-252
28. Мерзлый А.М., Калишин А.С., Мингалев И.В., Сахаров Я.А., Петров М.О., Черняков С.М., Янаков А.Т. Влияние авроральных высыпаний на зоны засветки однокачковыми лучевыми траекториями, выходящими из передатчиков КВ-диапазона на средних широтах // Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (Калининград-2021 28.06–02.07) - Калининград. - Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, - 2021, с. 321.
29. Телегин В. А., Романова Н. Ю., Жбанков Г. А., Панченко В. А. О сходстве и различии между ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направлением дрейфа плазмы в ионосфере над Москвой // Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (28 июня – 3 июля 2021 года, Калининград) – Калининград: изд-во Балтийского федерального университета им. И. Канта, 2021. – С.226-230. ISBN 978-5-9971-0650-8

Тезисы докладов на международных конференциях

1. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А., Маурчев Е.А. Использование мюонного телескопа в апатитах для исследования атмосферных вариаций космических лучей // Климатические риски и космическая погода. Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 18-18а.
2. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Измерение интенсивности потока вторичных космических лучей малогабаритным детектором заряженных частиц // Климатические риски и космическая погода. Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 23-24.
3. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Моделирование влияния протонов солнечных космических лучей на атмосферу земли в широком диапазоне высот // Климатические риски и космическая погода. Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 24.
4. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Перевод результатов моделирования прохождения протонов космических лучей через атмосферу земли в дозы излучения // Климатические риски и космическая погода. Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 25.
5. Кириллов А.С., Белуховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Влияние высокоэнергичных протонов на кинетику молекулярных азота и кислорода в средней атмосфере земли // Климатические риски и космическая погода. Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 79-80.
6. Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Germanenko A.V., Mikhalko E.A., Mauricev E.A. Experimentum crucis: background gamma radiation increasing during precipitation in the Arctic Ocean // Сборник тезисов докладов XII международной конференции "Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений", с. Паратунка, Камчатский край 27 сентября – 1 октября 2021
7. Balabin Yu.V. Influence of solar activity on the increase in background gamma radiation during precipitation // Сборник тезисов докладов XII международной конференции "Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений", с. Паратунка, Камчатский край 27 сентября – 1 октября 2021
8. Mauricev E.A., Germanenko A.V., Balabin Yu.V. Modeling of the Earth atmosphere ionization by the galactic cosmic rays and the solar cosmic rays // Сборник тезисов докладов XII международной конференции "Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений", с. Паратунка, Камчатский край 27 сентября – 1 октября 2021
9. Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Mauricev E.A., Mikhalko E.A., Gvozdevsky B.B. Muon telescope in the complex system of registration of cosmic rays in Apatity // Сборник тезисов докладов XII международной конференции "Солнечно-Земные связи и физика

предвестников землетрясений", с. Паратунка, Камчатский край 27 сентября – 1 октября 2021

10. Сецко П.В., Мингалев О.В. Влияние ионов кислорода на формирование токового слоя в хвосте магнитосферы Земли // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: XII международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 27 сентября – 01 октября 2021 г.: сб. тез. докл. – Паратунка: ИКИР ДВО РАН, 2021. – С.16
11. Setsko P.V., Despirak I.V., Sakharov Ya.A., Selivanov V.N., Werner R. GICs in the main transmission line “NorthernTransit” in Russia and in the Mantsala Finland Pipeline: cases 17.03.2013 and 15.03.2012 // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: XII международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 27 сентября – 01 октября 2021 г.: сб. тез. докл. – Паратунка: ИКИР ДВО РАН, 2021. – С.129-130.
12. Veneta Guineva, Irina Despirak, Rolf Werner, Rumiana Bojilova, Lyubomira Raykova, Mid-latitude effects of “expanded” geomagnetic substorms: a case study // EPJ Web of Conferences, V. 254, 01004, p.10, 2021, XII Anniversary International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202125401004>
13. Veneta Guineva, Rolf Werner, Andris Lubchich, Atanas Atanassov, Rumiana Bojilova, Lyubomira Raykova, Dimitar Valev, Irina Despirak, Development of a substorms catalog including the MPB observed at Panagjurishte station, Bulgaria // EPJ Web of Conferences, V. 254, 01002, p.9, 2021, XII Anniversary International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202125401002>
14. Белуховский В.Б., Джин Я., Милош В. Дневные сцинтилляции GPS сигналов по данным наблюдений на архипелаге Шпицберген. (Устный доклад) // XXVII Международный симпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”, 05-09 июля 2021 г., Москва. Тезисы, https://symp.iao.ru/files/symp/aoc/27/ru/abstr_13982.pdf
15. Despirak I.V., Kleimenova N.G., Gromova L.I., Lubchich A.A., Setsko P.V. Supersubstorm on 28 May 2011: geomagnetic effects // Thirteenth Workshop “Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere”, Primorsko, Bulgaria, 13-17 September, 2021, Book of abstracts, p. 16. DOI: 10.31401/WSoz.2021.abs
16. Guineva V., Werner R., Atanassov A., Bojilova R., Raykova L., Valev D., Setsko P.V., Lubchich A.A., Despirak I.V. Workout of a substorm catalog based on the ground-based magnetic data at the Panagjurishte station, Bulgaria // Thirteenth Workshop “Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere”, Primorsko, Bulgaria, 12-17 September, 2021, Book of abstracts, p. 18. DOI: 10.31401/WSoz.2021.abs
17. Setsko P.V., Despirak I.V., Sakharov Ya.A., Selivanov V.N. Relationship between GICs and supersubstorms: a case study // Thirteenth Workshop “Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere”, Primorsko, Bulgaria, 12-17 September, 2021, Book of abstracts, p. 19, DOI: 10.31401/WSoz.2021.abs
18. V. Safargaleev, T. Sergienko, K. Hosokawa, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, Sh-I. Oyama, S. Kurita, R. Fujii, On the influence of the orientation of pulsating auroral structure on associated geomagnetic pulsations in 3±1 Hz frequency range // The 3rd ISEE Symposium “PWING-ERG Conference and School”, ABSTRACT BOOK, p.71

Тезисы докладов на российских конференциях

1. Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Е.А. Маурчев Измерения космических лучей в акватории Ледовитого океана с помощью мобильного комплекса // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
2. Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко, Е.А. Михалко Наблюдение эффекта возрастания фонового гамма-излучения при осадках во время научной экспедиции в Ледовитом океане // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
3. А.В. Германенко, Ю.В. Балабин, Е.А. Маурчев, Е.А. Михалко, Б.Б. Гвоздевский, Л.И. Щур Новый детектор в комплексной системе регистрации космических лучей в Апатитах // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
4. Ю.В. Балабин, Е.А. Михалко, Е.А. Маурчев, А.В. Германенко Исследование особенностей возрастаний фонового гамма-излучения при осадках в течение 24-ого солнечного цикла // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
5. Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко, Е.А. Маурчев Проявление солнечной активности в различных компонентах космических лучей по данным станции Апатиты // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
6. Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Е.А. Маурчев Использование мюонного телескопа в Апатитах для проверки численных моделей прохождения космических лучей через атмосферу // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
7. Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко Измерение потока заряженной компоненты космических лучей с помощью портативного малогабаритного детектора // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
8. Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко Моделирование нуклон-нуклонных взаимодействий в атмосфере Земли для ядер гелия // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
9. Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко Методика пересчета результатов моделирования прохождения протонов ГКЛ через атмосферу Земли в эффективную и эквивалентную дозу излучения // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
10. Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский Ионизация атмосферы Земли протонами солнечных космических лучей во время события GLE72 // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
11. Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский Методика интеграции сетки значений жесткости геомагнитного обреза для моделирования взаимодействия протонов космических лучей с атмосферой Земли // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.

12. Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздецкий Учет питч-углового распределения в моделировании взаимодействия солнечных протонов с атмосферой Земли для событий GLE // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
13. А.С. Кириллов, В.Б. Белаховский, Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздецкий Исследование кинетики основных атмосферных составляющих во время высыпания высокоэнергичных протонов в среднюю атмосферу Земли // 44-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". 15-19 марта 2021 г.
14. I.I. Shagimuratov, I.E. Zakharenkova, I.I. Efishov, M.V. Filatov, N.Yu. Tepenitsyna \ Day-by-day behavior of GNSS positioning errors and TEC fluctuations associated with auroral disturbances in March 2015 \ Physics of Auroral Phenomena 44rd Annual Seminar Abstracts 15 – 19 March 2021 17с Апатиты. (постер)
15. М.В. Филатов, Р.Ю. Юрик, С.В. Пильгаев, И.И. Шагимуратов, Ю.В. Федоренко, М.В. Швец, А.В. Ролдугин, А.В. Ларченко, Ю.А. Шаповалова \ Влияние авроральных явлений на работу навигационных систем во время бури 14 ноября 2012 по данным обс. Баренцбург \ Physics of Auroral Phenomena 44rd Annual Seminar Abstracts 15 – 19 March 2021 23с Апатиты. (постер)
16. I.I. Shagimuratov, I.E. Zakharenkova, G.A. Yakimova, M.V. Filatov, N.Yu. Tepenitsyna \ The effect of annular solar eclipse on June 21, 2020 in the total electron content \ Physics of Auroral Phenomena 44rd Annual Seminar Abstracts 15 – 19 March 2021 59с Апатиты. (постер)
17. Б.В. Козелов, М.В. Филатов, Е.И. Скиотис \ Прототип доступной патрульной авроральной камеры для проекта, реализуемого в рамках программы КОЛАРКТИК \ Physics of Auroral Phenomena 44rd Annual Seminar Abstracts 15 – 19 March 2021 62с Апатиты. (постер)
18. С.В. Пильгаев, Б.В. Козелов, М.В. Филатов, Ю.В. Федоренко, А.В. Ларченко, А.В. Ролдугин, П.А. Будников \ О возможности исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций по оптическим и GNSS данным \ Physics of Auroral Phenomena 44rd Annual Seminar Abstracts 15 – 19 March 2021 64с Апатиты. (постер)
19. Nikitenko A.S., Kuznetsova M.V., Fedorenko Yu.V. Manninen J., Kleimenova N.G., Pilgaev S.V., Larchenko A.V. Wave structure feature of the VLF auroral hiss emissions obtained from the ground-based high-latitude measurements. 44-й Апатитский семинар «Физика авроральных явлений» 15 — 19 марта 2021 года.
20. A.V. Roldugin, S.M. Cherniakov, V.C. Roldugin. Noctilucent clouds in Lovozero on 6 and 7 August 2020. 44th Apatity seminar: Physics of Auroral Phenomena, Abstracts, 15 – 19 March 2021, Apatity
21. V.C. Roldugin, A.V. Roldugin Interplanetary magnetic fields during the weak proton aurora on 6march 2019. 44th Apatity seminar: Physics of Auroral Phenomena, Abstracts, 15 – 19 March 2021, Apatity
22. B.V. Kozelov, A.V. Roldugin, S. Oyama, Y. Miyoshi Spatial-temporal evolution of the pulsing aurora patterns observed by fast cameras in Fennoscandia and Kola peninsula, 44th Apatity seminar: Physics of Auroral Phenomena, Abstracts, 15 – 19 March 2021, Apatity

23. Б.В. Козелов, А.В. Ролдугин Высотное распределение аврорального свечения по данным триангуляционных измерений с малой базой в Апатитах и Баренцбурге, 44th Apatity seminar: Physics of Auroral Phenomena, Abstracts, 15 – 19 March 2021, Apatity
24. I.V. Despirak, N.G. Kleimenova, A.A. Lubchich, L.M. Malysheva, A.V. Roldugin, L.I. Gromova Polar substorms and Svalbard auroras: Case study, Apatity seminar: Physics of Auroral Phenomena, Abstracts, 15 – 19 March 2021, Apatity
25. Б.В. Козелов, А.В. Ролдугин Пространственно-временное самоподобие на малых масштабах в суббуревых активизациях по данным высокоскоростной камеры в Ловозеро, Apatity seminar: Physics of Auroral Phenomena, Abstracts, 15 – 19 March 2021, Apatity
26. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Особенности спектров высыпающихся электронов в лучистых формах полярных сияний, 44th Apatity seminar: Physics of Auroral Phenomena, Abstracts, 15 – 19 March 2021, Apatity
27. Сахаров Я.А., Козелов Б.В., Мёрзлый А.М., Мингалев И.В., Суворова З.В., Черняков С.М., Шубин В.Н., Талалаев А.Б., Тихонов В.В., Тихонов М.В., Янаков А.Т., Калишин А.С., Петров М.О., Крашенинников И.В. Оценка влияния геомагнитного возмущения на зоны доступности односкачковой связи КВ диапазона // Physics of Auroral Phenomena, 44th Annual Seminar, Apatity, 15-19 March 2021. Abstracts. PGI-21-01-141. – Apatity: PGI, RAS, 2021. – P. 65.
28. Antonenko O.V., Kirillov A.S. The study of Chamberlain and Herzberg I bands in the nightglow spectrum of the Earth's atmosphere. (Устный доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.53
29. Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Моделирование процесса распространения сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» в участках волновода Земля – ионосфера с горизонтально неоднородным распределением концентрации электронов. (Устный доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.37
30. Despirak I.V., Kleimenova N.G., Gromova L.I., Guineva V., Lubchich A.A., Losev A.V., Setsko P.V., Werner R. The dayside latitude effects of the geomagnetic supersubstorm observed in the main phase of the magnetic storm on 5 April 2010. (Устный доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.12
31. Kulikov Y.Y., Andriyanov A.F., Demin V.I., Demkin V.M., Kirillov A.S., Ryskin V.G., Shishaev V.A. The microwave monitoring of the middle atmosphere ozone on Kola Peninsula during last three winters. (Устный доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.68
32. Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В. Возмущения GPS сигналов в области каспа по данным наблюдений на архипелаге Шпицберген. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.61.

33. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Шиокава К., Миоши Е. Исследование P_g пульсаций по данным спутников ARASE, GOES и наземных станций. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.38.
34. Демин В.И. О пространственных вариациях изменений температуры воздуха на территории Мурманской области. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.68.
35. Демин В.И., Шишаев В.А. Мониторинг приземного озона на территории Мурманской области в 1999-2021 гг. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.69.
36. Демин В.И., Козелов Б.В., Муравьева Т.А. Связь вертикального распределения температуры воздуха в Хибинах с температурой воздуха над предгорной равниной. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.69.
37. Kirillov A.S., Werner R., Guineva V. The simulation of vibrational populations of electronically excited N₂ in Titan’s upper atmosphere during precipitations of high-energetic particles. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.55.
38. Despirak I.V., Lubchich A.A., Guineva V., Kleimenova N.G., Losev A.V., Setsko P.V., Werner R. Geomagnetic mid-latitude effects of different substorm types. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.13.
39. Козелов Б.В., Демин В.И., Лосев А.В. Особенности вертикального распределения температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в прибрежных и центральных районах Кольского п-ова. (Стендовый доклад) // Abstracts of the 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 15-19 March 2021. – Polar Geophysical Institute, Apatity, 2021. - P.70.
40. И.В. Мингалев, К.Г. Орлов, В.С. Мингалев. Результаты численного моделирования зарождения полярных циклонов в высокоширотной атмосфере // Abstracts of the 44th Annual Seminar on Physics of auroral phenomena, Apatity, 15-19 March, 2021. – Preprint PGI 21-01-141. –Apatity: PGI, 2021. – P. 70-71
41. К.Г. Орлов, И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, В.С. Мингалев. Численное моделирование общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли с учетом переноса теплового и солнечного излучения // Abstracts of the 44th Annual Seminar on Physics of auroral phenomena, Apatity, 15-19 March, 2021. – Preprint PGI 21-01-141. –Apatity: PGI, 2021. – P. 71
42. А.М. Мёрзлый, А.С. Калишин, Б.В. Козелов, И.В. Крашенинников, И.В. Мингалев, Я.А.Сахаров, А.Б. Талалаев, В.В. Тихонов, М.В. Тихонов, В.Н. Шубин, А.Т. Янаков. Проект экспериментальной однокачковой радиотрассы КВ-диапазона между районами на высоких и средних широтах // Abstracts of the 44th Annual Seminar on Physics

- of auroral phenomena, Apatity, 15-19 March, 2021. – Preprint PGI 21-01-141. –Apatity: PGI, 2021. – P. 63
43. О.В. Мингалев, П.В. Сецко, М.Н. Мельник, И.В. Мингалев, Х.В. Малова, Л.М. Зелёный. Влияние ионов кислорода и фоновых протонов на квазиравновесные конфигурации токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы // Abstracts of the 44th Annual Seminaron Physics of auroral phenomena, Apatity, 15-19 March, 2021. – Preprint PGI 21-01-141. – Apatity: PGI, 2021. – P. 22
 44. В.Н. Селиванов, А.В. Бурцев, Я.А. Сахаров, Анализ молниевой активности на Кольском полуострове по результатам инструментальных измерений в 2016-2020 гг., с.72 The 44th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" (PGI, March 15-19, 2021)
 45. V. Safargaleev, T. Sergienko, K. Hosokawa, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, Sh-I. Oyama, S. Kurita, R. Fujii, Altitude of pulsating arcs as inferred from tomographic measurements // Abstracts of the 44th Annual Seminaron Physics of auroral phenomena, Apatity, 15-19 March, 2021. – Preprint PGI 21-01-141. –Apatity: PGI, 2021. – P. 59
 46. D.A. Sheveleva, S.V. Apatenkov, Ya.A. Sakharov, E.I. Gordeev Auroral structures associated with geomagnetically induced currents // Abstracts of the 44th Annual Seminaron Physics of auroral phenomena, Apatity, 15-19 March, 2021. – Preprint PGI 21-01-141. –Apatity: PGI, 2021. – P. 17
 47. Сахаров Я.А., Козелов Б.В., Мёрзлый А.М., Мингалев И.В., Суворова З.В., Черняков С.М., Талалаев А.Б., Тихонов В.В., Тихонов М.В. Янаков А.Т. Влияние высыпаний частиц во время магнитных возмущений на зоны доступности однокачковой кв радиосвязи между районами на высоких и средних широтах // Физика плазмы в солнечной системе. Шестнадцатая ежегодная конференция, 8-12 февраля 2021 г., ИКИ РАН, Москва. Абстракты. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 278.
 48. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Шиокава К., Миоши Е. P_g пульсации, наблюдаемые спутниками ARASE, GOES и наземными станциями. (Устный доклад) // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021 г., с.231
 49. Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздецкий Б.Б. Электронная кинетика молекулярного азота и молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных протонов. (Устный доклад) // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021 г., с.200
 50. Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Особенности распространения ОНЧ волн в условиях горизонтально неоднородной ионосферы в высоких широтах. (Устный доклад) // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021 г., с.207
 51. Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В. Возмущения GPS сигналов при прохождении области каспа по данным наблюдений на архипелаге Шпицберген. (Стендовый доклад) // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021 г., с. 184

52. Кириллов А.С. Моделирование свечения молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли во время спрайтов. (Стендовый доклад) // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021 г., с.187
53. Кириллов А.С. Исследование свечения полос Лаймана-Бирджа-Хопфилда атмосферах Земли и Титана. (Стендовый доклад) // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021 г., с.188
54. Дэспирак И.В., Гинева В., Любчич А.А., Лосев А.В., Сецко П.В., Вернер Р. Геомагнитные суббуревые эффекты на средних широтах во время бури 11-12 апреля 2001. (Стендовый доклад) // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021 г., с. 286
55. Козелов Б.В., Миличенко Е.А., Орлов К.Г., Балабин Ю.В., Федоренко Ю.В., Сахаров Я.А., Юрик Р.Ю., Гомонов А.Д., Мингалев И.В., Ролдугин А.В., Проект гелиогеофизической обсерватории на Земле Франца-Иосифа: обоснование состава приборов и требования к их размещению // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН
56. Сахаров Я.А., Козелов Б.В., Мёрзлый А.М., Мингалев И.В., Суворова З.В., Черняков С.М., Талалаев А.Б., Тихонов В.В., Тихонов М.В., Янаков А.Т. Влияние высыпаний частиц во время сильных магнитных возмущений на зоны доступности однокачковой КВ радиосвязи между районами на высоких и средних широтах// Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН
57. Шевелева Д.А., Апатенков С.В., Сахаров Я.А., Гордеев Е.И, Авроральные структуры, связанные с геомагнитно индуцированными токами// Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН
58. Селиванов В.Н., Сахаров Я.А. Аналитическое решение для зависимости гармоник тока через трансформатор от величины ГИТ // Сборник тезисов 16-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН
59. Belakhovsky V., Pilipenko V., Sakharov Ya., Selivanov V. Impact of a magnetic storm on September 7-8, 2017 on geomagnetically induced currents in electric power lines. STP056. (Устный доклад) // 24-27 марта 2021, XIII школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса». 2021.
60. Belakhovsky V., Shiokawa K., Matsuoka A., Kasahara Y., Shinohara I., Miyoshi Y. The long-lasting QR emissions observed on Arase satellite and Lovozero station. STP057. (Устный доклад) // 24-27 марта 2021, XIII школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса». 2021
61. Карандашева Т.К., Иванов Б.В., Демин В.И., Ревина А.Д. Тенденции в изменении климата архипелага Шпицберген на примере ГМО «Баренцбург» за период 1911-2020 гг. (Устный доклад) // Программа научно-практической конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири (к 50-летию образования ФГБУ «СибНИГМИ»), г. Новосибирск, 20-22 октября 2021 г., с.14
62. Белаховский В.Б., Будников П.А., Пильгаев С.В. Воздействие суббуревых ионосферных возмущений на сигналы ГНСС в области аврорального овала. (Стендовый доклад) // Программа и тезисы 19-й Всероссийской открытой конференции «Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г., XIX.I.412.

63. Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздецкий Б.Б. Колебательная и электронная кинетика N₂ в средней атмосфере Земли при высыпании высокоэнергичных протонов. (Устный доклад) // Программа и тезисы 19-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г., XIX.D.326.
64. Кириллов А.С. Исследование влияния электронно-возбужденного молекулярного азота на образование радикалов в атмосфере Титана. (Устный доклад) // Программа и тезисы 19-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г., XIX.P.332.
65. Кириллов А.С. Исследование механизмов образования электронно-возбужденного синглетного кислорода и свечения Атмосферных полос O₂ в нижней полярной ионосфере. (Устный доклад) // Программа и тезисы 19-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г., XIX.I.339
66. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Анализ излучаемых полос Герцберга I и Чемберлена в спектре свечения ночного неба Земли. (Устный доклад) // Тезисы Всероссийской конференции с международным участием “Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы”, Москва, ИФА РАН, 22-23 ноября 2021 г., с.8.
67. Кириллов А.С. Кинетика синглетного кислорода в полярной ионосфере, на высотах свечения ночного неба и в спрайтах. (Устный доклад) // Тезисы Всероссийской конференции с международным участием “Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы”, Москва, ИФА РАН, 22-23 ноября 2021 г., с.27.
68. Иванов Б.В., Карандашева Т.К., Демин В.И., Ревина А.Д. Особенности изменений климата в Западном секторе Арктики на примере архипелага Шпицберген. // Программа международной научно-практической конференции «Дни Арктики в Санкт-Петербурге-2021: международное научное сотрудничество в Арктике в эпоху изменений климата», Санкт-Петербург, 25-29 ноября 2021 г., с.3.

Статьи, отправленные в печать

1. И. И. Шагимурагов, М. В. Филатов, И. И. Ефишов, Н. Ю. Тепеницына, Г. А. Якимова \\
Фазовые флуктуации навигационных сигналов и ошибки позиционирования над Европой в марте 2015 года \\
Известия Российской академии наук. Серия физическая 2022 г.
2. Ларченко А.В., Федоренко Ю.В., Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Бекетова Е.Б., Благовещенская Н.Ф. Особенности процессов генерации и распространения УНЧ/ОНЧ волн при воздействии на ионосферу модулированным коротковолновым радиоизлучением. // Известия вузов. Радиофизика.
3. Романова Н.Ю., Телегин В.А., Панченко В.А., Жбанков Г.А. Взаимосвязь дрейфа среднемасштабных неоднородностей и ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия (принято к печати)

4. Телегин В.А., Романова Н.Ю., Жбанков Г.А., Панченко В.А. О сходстве и различии между ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направлением дрейфа плазмы в ионосфере над Москвой // Известия ВУЗов. Радиофизика
5. Романова Н.Ю., Телегин В.А., Панченко В.А., Жбанков Г.А. Результат сопоставления ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направления дрейфа в F-области над московским регионом (в период январь-март 2012 г.) // Известия РАН. Серия физическая (принято к печати)
6. Телегин В.А., Романова Н.Ю., Легкий Н.М. Наблюдение мелкомасштабных неоднородностей с разными параметрами анизотропии в F-области среднеширотной ионосферы // Радиотехника и электроника
7. Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Мерзлый А.М., Зеленый Л.М. Роль ионов кислорода в структуре токового слоя ближнего хвоста магнитосферы Земли // Физика плазмы. 2022. Т. 48, № 3
8. Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Зеленый Л.М. Возможность образования токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы потоками ионов кислорода // Известия РАН. Серия физическая. 2022, том 86, № 3

Монографии и сборники

1. "Mingalev I. V., Orlov K. G., Mingalev V. S. Initial Formation of Polar Lows in the High-latitude Atmosphere: A Modeling Based Study Approach. // Chapter of the Book «Modern Advances in Geography, Environment and Earth Sciences», Vol. 5, 86–101. London: Book Publisher International, SCIENCEDOMAIN international. 2021. (1,0 а.л.). <https://doi.org/10.9734/bpi/magees/v5/10371D>
2. "V.S. Mingalev, O.V. Mingalev, G.I. Mingaleva. Study of the Large-scale Modification of the Ionosphere Induced by High Frequency Radio Waves with Different Powers: A Simulation Approach. // Chapter of the Book « Research Trends and Challenges in Physical Science», Vol. 2, pp.65–83. London: Book Publisher International, SCIENCEDOMAIN international. 2021. (1,2 а.л.). <https://doi.org/10.9734/bpi/rtcp/v2/4535F>
3. Шипилов Э.В., Шкарубо С.И. Тектоника баренцевоморской континентальной окраины // Глава в монографии «Система Баренцева моря» / Под редакцией академика А.П. Лисицына. — М.: ГЕОС, 2021. — С. 11–25. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(4) (Глава в коллективной монографии)
4. Артющков Е.В., Балуев А.С., Богацкий В.И., Бургутто А.Г., Васильев А.И., Васильев А.С., Величко Б.М., Дьяченко А.Б., Журавлев В.А., Заяц И.В., Заварзина Г.А., Зуйкова О.Н., Иванов Г.И., Казанин Г.С., Казанин А.Г., Кацанюк В.А., Кириллова-Покровская Т.А., Костин Д.А., Крюкова Г.Г., Кузнецов А.В., Макаров Е.С., Матишов Г.Г., Неупокоева А.А., Павлов С.П., Прищепа О.М., Радченко М.С., Ступакова А.В., Тарасов Г.А., Черников С.Ф., Шадрин Е.Ю., Шипилов Э.В., Шкарубо С.И., Шлыкова В.В. «Шельфовые осадочные бассейны Российской Арктики: геология, геоэкология, минерально-сырьевой потенциал». СПб.: Реноме, 2020. — 544 с. Рис. 249, табл. 50, библиогр. назв. 310. ISBN 978-5-00125-347-1 DOI: 10.25990/dhw6-9x41 (Коллективная монография)