Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ И НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В 2016 г.

Иркутск, 2017

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук создан 27 мая 1960 г.

Директор Института — чл.-корр. РАН А.П. Потехин

Основные научные направления Института:

– физика Солнца: изучение строения и активности Солнца и солнечноподобных звезд; физика солнечных вспышек и корональных выбросов массы; изучение эволюции Солнца, структуры солнечных магнитных полей и корональной плазмы; гелиосейсмология; механизмы радиоизлучения и методы диагностики корональной плазмы; мониторинг активных процессов на Солнце как источников возмущений в гелиосфере, магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли; разработка новых методов и аппаратуры для исследования в области астрофизики и физики Солнца;

– физика околоземного космического пространства: физика магнитосферы, ионосферы и верхней атмосферы; изучение магнитосферно-ионосферно-атмосферно-литосферных связей; выяснение механизмов влияния гелиосферных факторов на околоземное космическое пространство и атмосферу Земли, изучение эффектов космической погоды; ионосферное распространение радиоволн и радиофизические методы дистанционного зондирования; разработка новых методов и аппаратуры для диагностики и мониторинга окружающей среды (магнитосферы, ионосферы, атмосферы, литосферы) и активного воздействия на нее;

– проблемы астероидно-кометной опасности и экологии космоса: развитие оптических и радиофизических методов в области астероидно-кометной опасности, техногенного засорения и экологии космического пространства; мониторинг космического мусора и состояния космических аппаратов и станций;

– анализ и прогноз состояния климатической системы Земли: разработка и совершенствование моделей физических механизмов изменения климата с учетом солнечной активности; погодообразующие и климатообразующие факторы; влияние гелиосферных и геосферных факторов на атмосферу и стратосферно-тропосферный обмен.

1. СТРУКТУРА ИНСТИТУТА

Научные подразделения

Отдел физики околоземного космического пространства

Руководитель отдела — д.ф.-м.н. В.И. Куркин

- лаборатория физики ионосферно-магнитосферного взаимодействия (зав. лабораторией — д.ф.-м.н. А.В. Тащилин);
- лаборатория изучения плазменно-волновой структуры магнитосферы (зав. лабораторией — к.ф.-м.н. Д.Ю. Климушкин);
- лаборатория развития новых методов радиофизической диагностики атмосферы (зав. лабораторией — к.ф.-м.н. К.Г. Ратовский);
- лаборатория физики нижней и средней атмосферы (зав. лабораторией — к.ф.-м.н. Р.В. Васильев);
- лаборатория исследования динамических процессов в ионосфере (зав. лабораторией — к.ф.-м.н. О.И. Бернгардт);
- Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория (зав. обсерваторией — д.ф.-м.н. Р.А. Рахматулин);
- Геофизическая обсерватория (ГФО) (зав. обсерваторией — А.В. Татарников);
- Обсерватория радиофизической диагностики атмосферы (ОРДА) (зав. обсерваторией — А.В. Заворин);
- Норильская комплексная магнитно-ионосферная станция (Норильская КМИС) (зав. станцией — О.Г. Омельян);

- Совместная научно-исследовательская лаборатория комплексного мониторинга ионосферы Арктической зоны ИСЗФ СО РАН и физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (руководитель — д.ф.-м.н. В.И. Куркин).

Отдел радиоастрофизики

Руководитель отдела — к.ф.-м.н. С.В. Лесовой

Руководитель научного направления по радиоастрофизике — д.ф.-м.н. А.Т. Алтынцев

- лаборатория мониторинга солнечной активности (зав. лабораторией — к.т.н. А.В. Губин);
- лаборатория информационного обеспечения и методологии исследований (зав. лабораторией — к.ф.-м.н. Д.В. Просовецкий);
- лаборатория радиоастрофизических исследований Солнца (зав. лабораторией — д.ф.-м.н. А.А. Кузнецов);
- Радиоастрофизическая обсерватория (РАО) (зав. обсерваторией — С.В. Кицанов).

Отдел физики Солнца

Руководитель отдела — д.ф.-м.н. М.Л. Демидов

Руководитель научного направления по физике Солнца — чл.-корр. РАН В.М. Григорьев

- лаборатория экспериментальной физики Солнца и астрофизического приборостроения (зав. лабораторией — к.ф.-м.н. Д.Ю. Колобов);
- лаборатория строения солнечной атмосферы (зав. лабораторией — д.ф.-м.н. В.И. Скоморовский);
- лаборатория солнечной активности (зав. лабораторией — д.ф.-м.н. А.В. Мордвинов);
- лаборатория инфракрасных методов в астрофизике (зав. лабораторией — к.ф.-м.н. М.В. Еселевич);
- Байкальская астрофизическая обсерватория (БАО) (зав. обсерваторией — к.ф.-м.н. А.В. Боровик);
- Саянская солнечная обсерватория (ССО) (зав. обсерваторией — к.ф.-м.н. А.А. Луковникова).

Конструкторский отдел

Зав. отделом — А.Я. Смольков

- сектор электронной аппаратуры (зав. сектором — А.Я. Смольков);
- экспериментальный цех (нач. цеха — В.С. Федотов).

Научно-вспомогательные подразделения

- редакционно-издательский отдел (зав. отделом — М.В. Никонова);
- научная библиотека (зав. библиотекой — О.Н. Капуркина);
- патентный отдел (зав. отделом — д.ф.-м.н. Н.И. Кобанов);
- первый отдел (нач. отдела — Л.Ф. Алешкова);
- группа переводчиков;
- группа научно-технической информации.

Отдел по защите информации и сетевому сопровождению

Зав. отделом — А.В. Джурик

Административно-хозяйственные подразделения

- отдел кадров (зав. отделом — В.И. Дроздова);
- канцелярия (вед. документовед — О.А. Лушева);
- бухгалтерия (гл. бухгалтер — В.С. Алейникова);
- планово-экономический отдел (зав. отделом — И.Н. Леонова);
- службы и группы хозяйственного обслуживания.

Руководство Института

Директор	чл.-корр. РАН А.П. Потехин
Научный руководитель Института	академик Г.А. Жеребцов
Заместители директора по научной работе	д.ф.-м.н. М.Л. Демидов д.ф.-м.н. А.В. Медведев д.ф.-м.н. С.В. Олемской к.ф.-м.н. С.В. Лесовой
Заместитель директора по международной научной деятельности	к.ф.-м.н. Р.А. Сыч
Заместитель директора по научной и инновационной работе	к.ф.-м.н. В.В. Хахинов
Ученый секретарь	к.ф.-м.н. И.И. Салахутдинова
Заместитель директора по общим вопросам	А.Ю. Куликов

Адрес:	664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126а
Телефон:	(3952) 42-82-65
Факс:	(3952) 51-16-75, (3952)42-55-57
e-mail:	uzel@iszf.irk.ru
web:	www.iszf.irk.ru

2. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ СОЛНЦА, РАДИОАСТРОФИЗИКИ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Научные исследования выполнялись в отделах физики Солнца и радиоастрофизики.

Приоритетное направление II.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.

1. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.1 «Фундаментальные проблемы процессов космической погоды, включая процессы на Солнце, в межпланетной среде, магнитосфере и атмосфере Земли. Контроль и экология околоземного космического пространства» (координатор — акад. Г.А. Жеребцов).

1.1. Проект II.16.1.5 «Развитие оптических и радиофизических методов в области астероидно-кометной опасности, техногенного засорения и экологии космического пространства» (руководитель проекта — к.ф.-м.н. М.В. Еселевич).

1.2. Проект II.16.1.6 «Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца» (руководитель проекта — к.ф.-м.н. Д.В. Просовецкий).

2. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.3 «Физика Солнца и астрофизическое приборостроение» (координатор — чл.-корр. РАН В.М. Григорьев).

2.1. Проект II.16.3.1 «Магнитные поля Солнца и природа солнечной активности» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. А.В. Мордвинов).

2.2. Проект II.16.3.2 «Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере» (руководители проекта — д.ф.-м.н. А.Т. Алтынцев, д.ф.-м.н. Н.И. Кобанов).

2.3. Проект II.16.3.3 «Методы и инструменты астрофизического эксперимента» (руководители проекта — д.ф.-м.н. М.Л. Демидов, к.ф.-м.н. С.В. Лесовой).

3. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.2 «Физика космических лучей и солнечно-земных связей» (координатор — д.ф.-м.н. С.А. Стародубцев).

3.1. Проект II.16.2.4 «Диагностика межпланетной среды по данным наблюдений космических лучей» (руководитель проекта — к.ф.-м.н. В.Е. Сдобнов).

4. Программа Президиума РАН № 7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (координаторы — акад. Л.М. Зеленый, чл.-корр. Б.М. Шустов).

4.1. Проект «Фотометрические наблюдения и исследования нестационарных астрофизических объектов на телескопе АЗТ-33ИК» (руководитель проекта — чл.-корр. РАН В.М. Григорьев).

4.2. Проект «Радиоастрономические исследования динамических процессов в солнечной короне» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. А.А. Кузнецов).

4.3. Проект «Развитие методов диагностики процессов солнечной активности и ее проявлений в ММП, магнитосфере и ионосфере Земли» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. А.Т. Алтынцев).

5. Программа Президиума РАН № 23 «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика» (координатор — акад. В.А. Рубаков).

5.1. Проект «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям» (руководитель проекта — к.ф.-м.н. В.Е. Сдобнов).

6. Программа Президиума РАН № 31 «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности. Фундаментальные исследования процессов горения и взрыва. Актуальные проблемы робототехники» (координаторы — акад. Ю.М. Михайлов, акад. В.А. Левин, акад. Ф.Л.Черноусько).

6.1. Проект «Фундаментальные основы мониторинга и контроля околоземного космического пространства в оптическом диапазоне» (руководитель проекта — чл.-корр. РАН В.М. Григорьев).

Выполнялось 7 грантов РФФИ:

1. 15-02-01089-а «Солнечные вспышки в микроволнах: от формирования токовых слоев до импульсной стадии» (научный руководитель — д.ф.-м.н. А.Т. Алтынцев);

2. 15-02-03717-а «Исследование процессов ускорения частиц в солнечных вспышках на основе уникальных наблюдений гамма-спектрометра Конус-Винд и Сибирского солнечного радиотелескопа» (научный руководитель — д.ф.-м.н. А.А. Кузнецов);

3. 15-02-01077-а «Исследование возникновения и движения корональных выбросов массы и связанных с ними ударных волн по многоволновым данным» (научный руководитель — д.ф.-м.н. В.Г. Файнштейн);

4. 15-32-20504-а «Исследование трехмерной структуры атмосферы солнечных активных областей по результатам многоволновых наблюдений, моделирования и корональной сейсмологии» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Д.Ю. Колобов);

5. 16-32-00268-мол-а «Поиск наблюдательных проявлений альфвеновских волн в атмосфере солнечных факелов» (научный руководитель — к.ф.-м.н. А.А. Челпанов);

6. 16-32-00315-мол-а «Исследование вариаций магнитного поля, сопровождающих возникновение корональных выбросов массы, связанных с эрупцией волокна» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Я.И. Егоров;

7. 16-32-50172-мол-нр «Моделирование микроволнового излучения нетепловых электронов из скрученных магнитных петель в солнечных вспышках» (научный руководитель — д.ф.-м.н. А.А. Кузнецов).

Выполнялись:

- работы по укрупненному инвестиционному проекту «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» (научный руководитель — акад. Г.А. Жеребцов);
- прикладные работы в рамках хозяйственных договоров.

2.1. Магнитные поля Солнца и природа солнечной активности

2.1.1. Измерения крупномасштабных магнитных полей Солнца

В 2016 г. выполнены измерения крупномасштабных магнитных полей Солнца и наблюдения его активных областей, комплексов активности. На телескопе СТОП в рамках проекта СО РАН II.16.3.1 «Магнитные поля Солнца и природа солнечной активности» выполнялись регулярные измерения напряженности общего магнитного поля Солнца, регистрировались полнодисковые магнитограммы, показывающие распределение крупномасштабных магнитных полей по диску Солнца. Общее число дней наблюдений в январе–ноябре 2016 г. составляет 48. Проведено 56 измерений напряженности общего магнитного поля Солнца и получено 55 магнитограмм крупномасштабных магнитных полей.

С использованием регулярных наблюдений магнитных полей Солнца на телескопе СТОП Кисловодской горно-астрономической станции Главной астрономической обсерватории (ГАС ГАО РАН) выполнены в потенциальном приближении (PFSS — Potential Field Source Surface) с использованием эмпирической модели Wang–Sheeley–Arge (WSA) расчеты параметров межпланетной среды, включая скорость солнечного ветра на орбите Земли. Показано хорошее соответствие модельных расчетов и экспериментальных данных во время невысокого уровня солнечной активности (рис. 1), что позволяет использовать данные СТОП для прогноза космической погоды в такие периоды.

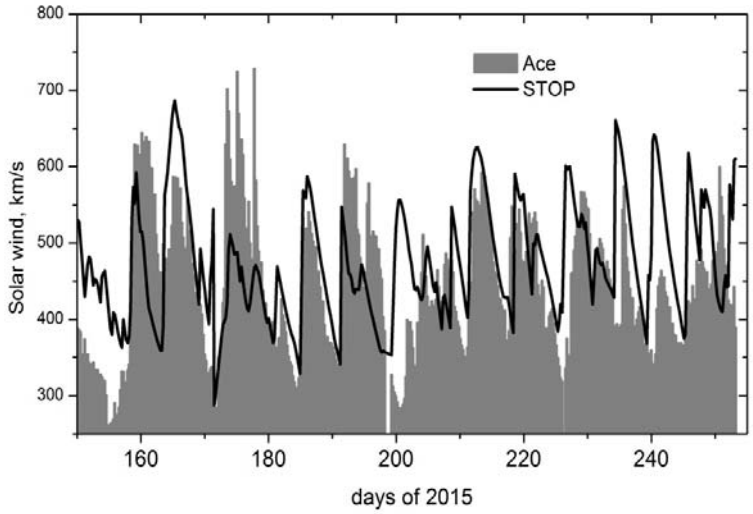


Рис. 1. Сравнение измерений скорости солнечного ветра на спутнике ACE в точке L1 со значениями, рассчитанными по данным наблюдений на телескопе СТОП в Кисловодске

Публикации:

1. Tlatov A.G., Pashenko M.P., Ponyavin D.I., Svidskii P.M., Peshcherov V.S., Demidov M.L. Forecast of solar wind parameters according to STOP magnetograph observations // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 8. P. 1–9. DOI: 10.1134?S0016793216080223.

Рассмотрен массив данных MWO по синхронным измерениям продольных магнитных полей Солнца в линиях FeI 525.02 нм и NaI 589.59 нм за 2000–2012 гг. Проанализированы отношения магнитных полей R, определенные с использованием метода, предложенного Стенфло (1973 г.) [1]. При общем сопоставлении показаны вариации R и коэффициента корреляции C в цикле солнечной активности. Диагностирована нелинейная зависимость R и C от величины магнитного поля, также меняющаяся с циклом (рис. 2).

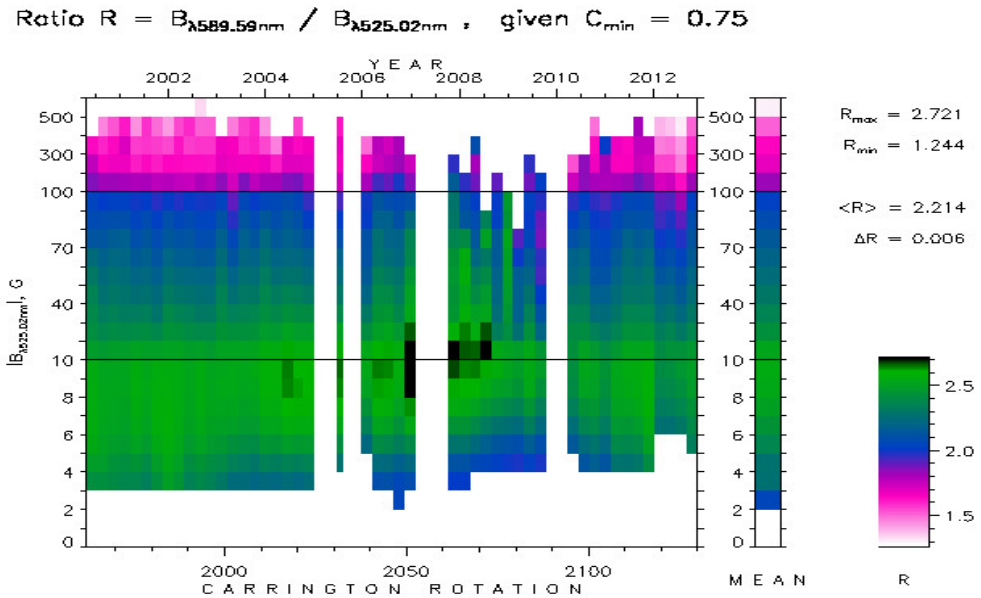


Рис. 2. Диаграмма отношения $R(|B_{Fe}|, t)$ при соблюдении требования для корреляции: $C(|B_{Fe}|, t) \geq 0.75$. Здесь t — время, выраженное в кэррингтоновских оборотах (внизу) и в годах (сверху). Модуль магнитного поля $|B_{Fe}|$ рассматривается как независимая переменная (вертикальная ось). Правее показаны усредненные по времени значения R. R_{max}, R_{min} и $\langle R \rangle$ — максимальное, минимальное и среднее значения $R(|B_{Fe}|, t)$, а ΔR — соответствующая ошибка среднего. Шкала R представлена справа внизу

Анализ зависимостей *R* и *C* от величины магнитного поля в линии FeI 525.02 нм и от времени позволил выделить характерные диапазоны 4–7, 9–40, 50–70 и 70–80 Гс. Для трех исходных магнитограмм, соответствующих разным фазам цикла активности (22.02.2001, 25.02.2009 и 30.07.2011), было выполнено сопоставление локализации на диске точек каждого выделенного диапазона с пространственным распределением структурных элементов солнечной активности по наблюдениям фотосферы в белом свете и хромосферы в линии CaII K3 393.3 нм. Установлено, что диапазон 4–7 Гс соотносится с периферией активных областей и компактными униполярными областями, 9–40 Гс — с кальциевыми факелами, 50–70 Гс — преимущественно с тонкими границами между факелами и крупным пятнами. Между магнитными потоками в диапазонах 50–70 и 4–7 Гс обнаружена обратная связь (рис. 3).

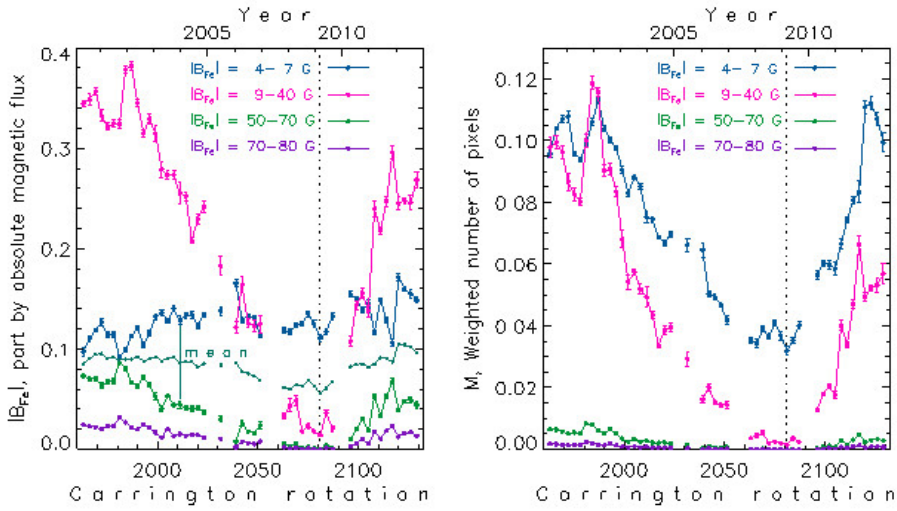


Рис. 3. Временные вариации абсолютных магнитного потока $|B_{Fe}|$ (слева) и соответствующие изменения взвешенного числа точек *M* (справа) в выделенных диапазонах. Пунктирная вертикальная линия отмечает минимум 23-го цикла. Соседние точки в непрерывных сериях наблюдений соединены сплошными линиями. Линия «mean» соответствует среднему между потоками в диапазонах 50–70 и 4–7 Гс

Публикации:

1. Golubeva E.M. Variations in ratio and correlation of solar magnetic fields in the FeI 525.02 nm and NaI 589.59 nm lines according to Mount wilson measurements during 2000–2012 // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 2213–2241. DOI: 10.1007/s11207-016-0973-3.

2.1.2. Обращение полярностей на полюсах Солнца и формирование полярных корональных дыр в текущем цикле

В 2013–2016 гг. в полярных областях Солнца произошла смена доминирующих магнитных полярностей, которая сопровождалась глобальной реорганизацией открытого магнитного потока. С прибытием первых униполярных магнитных областей (УМО) «новых» полярностей на полюса Солнца существовавшие там полярные корональные дыры (ПКД) разрушились. Позже ПКД сформировались уже в новых полярностях. В 2016 г. было исследовано образование ПКД в соотношении с магнитными полями.

Для изучения эволюции магнитных полей (МП) и корональных дыр (КД) использованы их синоптические карты по данным GONG и SDO/AIA. Синоптические карты были усреднены по 5-кэррингтоновским оборотам, при этом выполнялась коррекция за дифференциальное вращение. На них были определены области долгоживущих комплексов активности (КА), модуль МП>=10 Гс, а также границы УМО (изолинии ±1 Гс). Выделенные объекты были нанесены на усредненные карты КД.

На рис. 4 приведены усредненные карты, показывающие изменения активности Солнца и формирование ПКД в цикле 24. Середины центральных оборотов приходятся на 14

июня 2014 г., 1 октября 2014 г., 4 июня 2015 г. и 26 апреля 2016 г. соответственно. На сером фоне более светлыми и темными тонами отмечены области частого появления КД с учетом полярностей МП. Белыми и черными пятнами показаны положения долгоживущих КА. Белые и черные контуры соответствуют значениям ±1 Гс и указывают границы УМО.

В период высокой активности (июнь–сентябрь 2014 г.) наблюдаются долгоживущие КА1, КА2 и КА3 (рис. 4, *а*, *б*). По мере распада активных областей, входящих в КА, их магнитные поля рассеиваются в окружающей фотосфере, образуя обширные УМО. В 2014 г. в южном полушарии преобладают высокоширотные УМО отрицательной полярности, которые фактически предопределили обращение МП на южном полюсе.

На усредненных распределениях наблюдаются ансамбли корональных дыр (АКД). На рис. 4, *а*, *б* АКД показаны светлыми и темными тонами, согласно знаку МП. На низких и средних широтах АКД (отмечены черными и белыми стрелками) группируются вблизи своих источников. АКД1, АКД2 и АКД3 связаны непосредственно с КА1, КА2 и КА3. Южные границы этих АКД оказались расположены примерно вдоль границы УМО, отмеченной контуром –1 Гс. Далее АКД1 и АКД4 объединяются, охватывая диапазон долгот более 180° (рис. 4, *б*).

В ходе меридионального переноса УМО отрицательной полярности достигли южного полюса (рис. 4, *в*). Это привело к смене доминирующей полярности на южном полюсе. При этом АКД преобразуется в ПКД, охватывая почти все долготы полярной зоны. В ходе дальнейшей эволюции ПКД ее широтная протяженность значительно растет (рис. 4, *г*). В это же время сформировались трансэкваториальные коридоры, через которые открытый магнитный поток переходил из одного полушария в другое. Эти изменения завершились глобальной реорганизацией открытого магнитного потока и формированием ПКД новых полярностей.

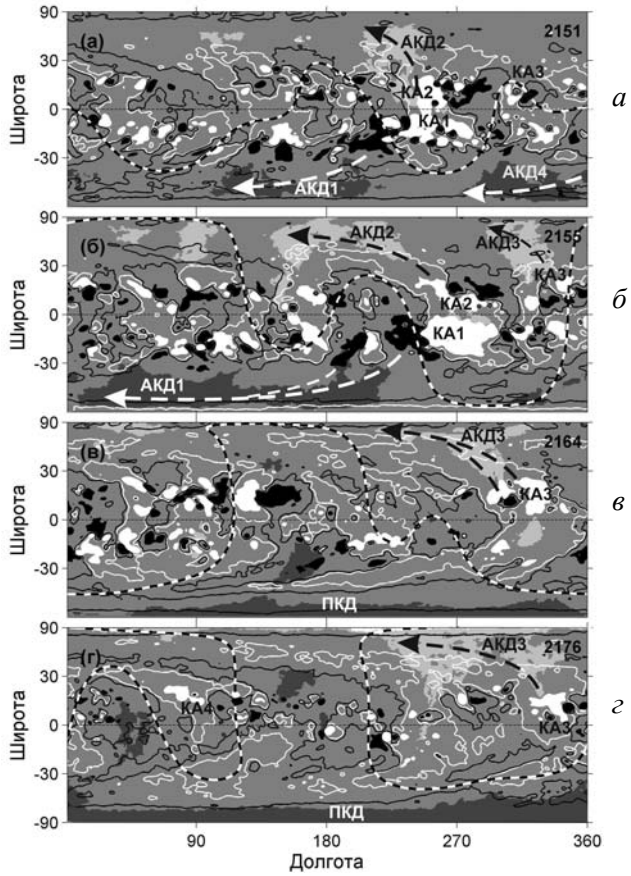


Рис. 4. Усредненные синоптические карты МП для оборотов 2151 (*а*), 2155 (*б*), 2164 (*в*) и 2176 (*г*). Области положительной и отрицательной полярности (>10 Гс по модулю) показаны белыми и черными пятнами соответственно, ПКД и АКД — светлыми и темными тонами на сером фоне. Черно-белые штрихи — нейтральные линии на поверхности квазиисточника

Установлено, что распад комплексов активности в южном полушарии Солнца в 2014 г. привел к образованию ансамбля корональных дыр, из которого сформировалась корональная дыра на южном полюсе Солнца (рис. 5, *a*, *b*). Сложная структура магнитных полей в полярной зоне северного полушария на полтора года задержала формирование корональной дыры на северном полюсе (рис. 5, *c*).

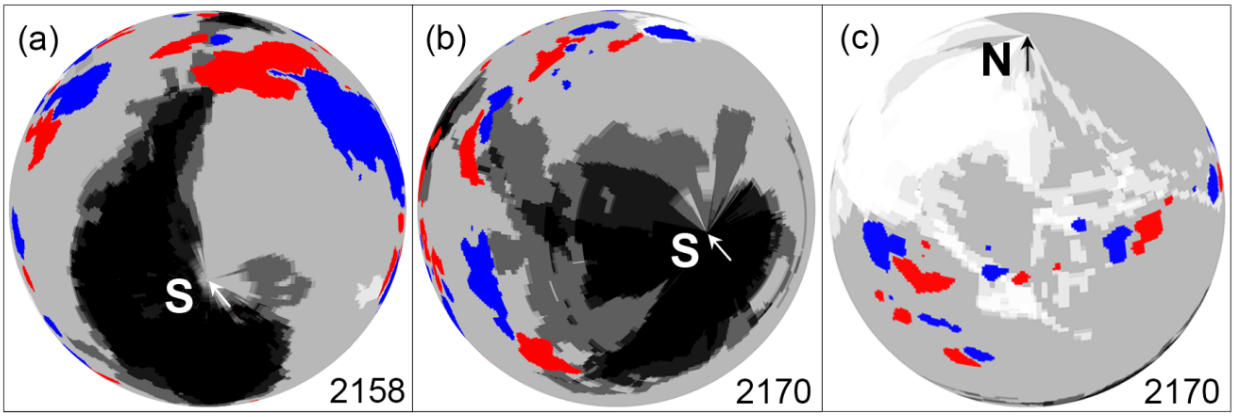


Рис. 5. Формирование корональных дыр на южном (*a*, *b*) и северном (*c*) полюсах. Области частого появления корональных дыр отрицательной/положительной полярностей показаны черными/белыми тонами. Магнитные поля комплексов активности для положительной/отрицательной полярностей (>10 Гс по модулю) показаны красным/синим цветами. Южный и северный полюса отмечены стрелками. Снизу указаны номера кэррингтоновских оборотов

Публикации:

1. Golubeva E.M., Mordvinov A.V. Decay of activity complexes, formation of unipolar magnetic regions, and coronal holes in their causal relation // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 3605–3617. DOI: 10.1007/s11207-016-1011-1.

2. Mordvinov A.V., Pevtsov A.A., Bertello L., Petrie G.J.D. The reversal of the Sun's magnetic field in cycle 24 // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 3–18. DOI: 10.12737/19856.

3. Мордвинов А.В., Голубева Е.М. Формирование полярных корональных дыр в текущем цикле солнечной активности // Труды Всероссийской конф. «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». СПб.: ГАО РАН, 2016. С. 223–226.

2.1.3. Закономерности формирования моат-ячеек в процессе развития солнечных пятен

Ранее было установлено, что кольцевая конвективная ячейка «моат» возникает в самом начале формирования активной области [2]. Детальное исследование горизонтальных движений тонкоструктурных магнитных элементов показало, что вытекание элементов магнитного поля из пятна начинается сразу с появлением полутени. Полутень возникает по мере образования и удлинения спайнов. Непосредственно вслед за этим начинается горизонтальное движение элементов магнитного поля из спайнов к границе полутени и далее в фотосферу. Протяженность спайна восстанавливается и может произойти последующее неоднократное образование выходящих магнитных элементов. После выхода из полутени магнитные образования либо двигаются до некоторой границы, образуя кольцевую магнитную структуру, окружающую развитое пятно, либо ослабевают и исчезают. На рис. 6 приведена магнитограмма для области формирующегося солнечного пятна, показаны направления движения элементов магнитного поля из спайнов. Скорость горизонтальных движений магнитных элементов из спайнов достигает 1 км/с. Таким образом, установлено, что выход магнитных элементов за пределы полутени, создающий структуру магнитного поля кольцевой моат-ячейки, начинается на стадии формирования пятна (а не на стадии разрушения, как полагалось с момента их обнаружения) [3].

Рис. 6. Магнитограмма продольного поля. Красным цветом нанесены контуры тени и полутени, синим показаны направления движения элементов магнитного поля из спайнов

Публикации:

1. Григорьев В.М., Ермакова Л.В. Подъем вещества и динамика магнитного поля в формирующейся полутени солнечного пятна // Астрон. журнал. 2016. Т. 93, № 2. С. 240–246.

2.1.4. Наблюдательные свидетельства связи всплытия магнитных полей, токов и солнечных вспышек 10 мая 2012 г.

В контексте задачи по исследованию многоволновых наблюдений и данных о магнитном поле солнечной вспышки M5.7 (АО 11476 10 мая 2012 г. в 04:18 UT) проведено восстановление коронального магнитного поля и рассчитано распределение вертикальной компоненты плотности электрического тока на уровне фотосферы (рис. 7, 8). Восстановление поля проведено в нелинейном бессиловом приближении по методу оптимизации. В качестве входных данных были использованы векторные магнитограммы SDO/HMI.

В структуре восстановленного поля выявлена существенно непотенциальная конфигурация силовых линий, протянувшаяся вдоль нейтральной линии фотосферного поля и способствующая развитию вспышки типа сигмоид. Обнаружена также система более высоких петель, расположенных над сигмоидом, которая, возможно, воспрепятствовала развитию коронального выброса массы.

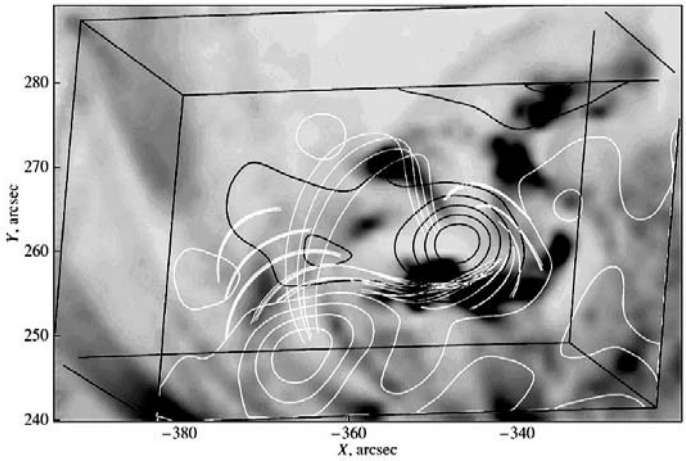


Рис. 7. Фрагмент негативного изображения в EUV-линии 171 Å АО NOAA 11476 (SDO/AIA) 10 мая 2012 г. в 04:12:00 UT. Белым и черным цветом показаны изолинии радиального компонента положительного и отрицательного магнитного поля в области вспышки с напряженностью 80, 60, 40, 20 % от максимума в тот же момент времени. Белым цветом показаны также силовые линии над нейтральной линией и более высокие линии петель, соединяющие холмы поля противоположного знака. Прямые линии — проекционный куб. Шкалы — расстояние от центра диска в угловых секундах

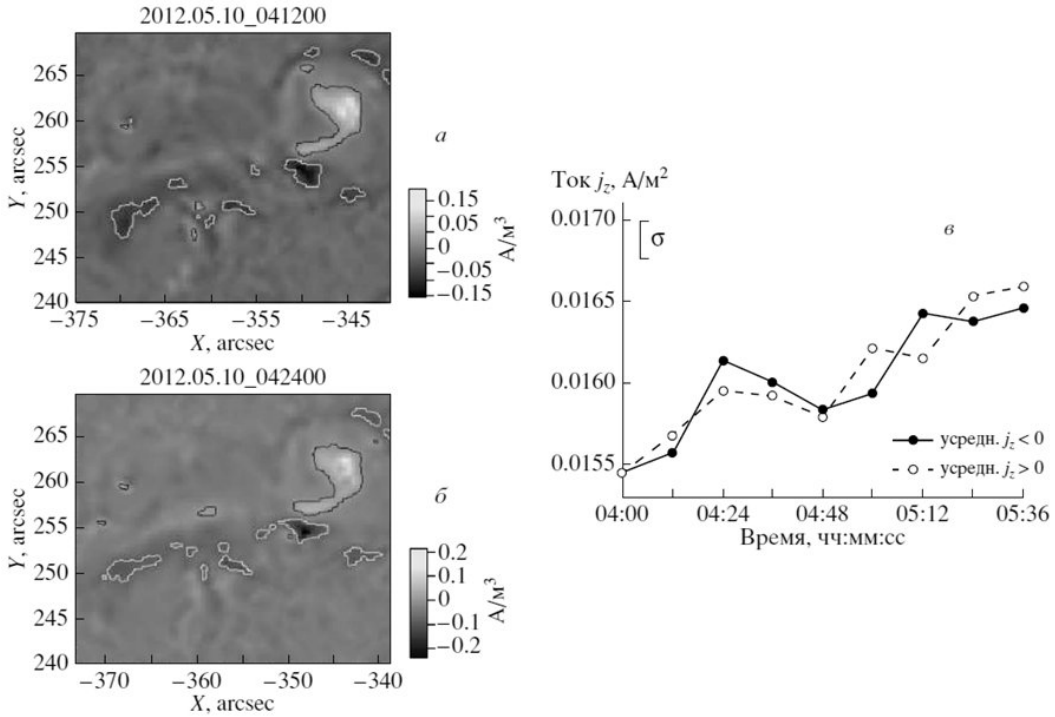


Рис. 8. Слева: фрагменты карт вертикальных токов j_z, рассчитанных на время до и после максимума вспышки 04:12 UT и 04:24 UT соответственно; контуры — уровни $j_z \pm 0.05$ А/м^2. Шкалы — расстояние от центра диска в угловых секундах. Справа — кривые эволюции усредненного тока $j_z<0$ (сплошная линия) и $j_z>0$ (штриховая линия) 10 мая 2012 г. Для отрицательного поля показан $|j_z|$. Вертикальный бар — ошибка измерений

В распределении вертикальной плотности тока выделяется зона резкого градиента, соответствующая области сгущения силовых линий сигмоида. Здесь же происходит наибольшее изменение плотности тока с течением времени. Отмечается постепенное повышение средней плотности токов обоих знаков, отражающее тот факт, что в день наблюдений вспышечная активность исследуемой АО постепенно возрастала.

Публикации:

1. Лившиц М.А., Григорьева И.Ю., Мышьяков И.И., Руденко Г.В. Наблюдательные свидетельства связи всплытия магнитных полей, токов и солнечных вспышек 10 мая 2012 г. // Астрон. журнал. 2016. Т. 93, № 10. С. 907–917.

2.1.5. Развитие моделей динамо солнечной активности

Данные космического телескопа «Кеплер» о супервспышках на подобных Солнцу звездах, как и данные о солнечной активности за прошедшие тысячелетия, указывают на преходящие эпохи необычайно высокой активности. Предложено объяснение таких глобальных максимумов активности в рамках теории солнечного динамо. Цикличность активности в моделях динамо обеспечивает положительная величина (параметр α) альфа-эффекта. Искусственное обращение знака альфа-эффекта приводит к стационарному динамо и стократному возрастанию магнитной энергии. Положительный альфа-эффект для Солнца связан с правилом Джоя для углов наклона биполярных групп солнечных пятен.

Наблюдения отмечают нарушения этого правила. Достаточно продолжительные нарушения правила Джоя на фазе роста активности могут приводить к временным переходам динамо к стационарному режиму со значительным возрастанием магнитной энергии. Этот качественный сценарий глобальных максимумов активности подтвержден численными расчетами модели динамо с флуктуирующим альфа-эффектом. Расчеты охваты-

вают несколько тысяч циклов активности и показывают примеры циклов с очень большой магнитной энергией (рис. 9). Предварительные оценки, однако, дают ничтожно малую вероятность солнечных супервспышек.

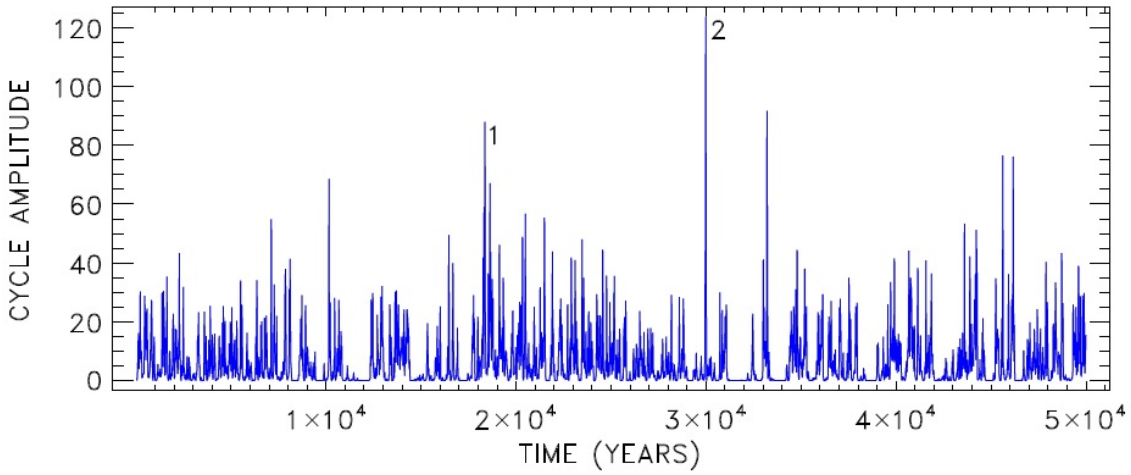


Рис. 9. Амплитуды магнитной энергии около 4000 циклов активности по расчетам модели динамо. Приведены величины, отнесенные к среднему значению. Цифрами 1 и 2 помечены случаи наиболее значимых превышений «среднего» цикла по магнитной энергии

Основной трудностью для развития моделей солнечного динамо является отсутствие данных о магнитных полях под солнечной поверхностью. Установлено, что индикатором подфотосферных магнитных полей может служить радиальная неоднородность вращения вблизи поверхности Солнца. Гелиосейсмология обнаружила возрастание скорости вращения с глубиной непосредственно под солнечной поверхностью. Теория объясняет это обстоятельство анизотропией солнечной конвекции. Анизотропия, в свою очередь, чувствительна к магнитному полю. Рассчитана функциональная зависимость радиальной неоднородности вращения от напряженности тороидального магнитного поля. Показано, что неоднородность угловой скорости в приповерхностном слое толщиной около 10 тыс. км возрастает с напряженностью поля и может служить индикатором достаточно сильных полей порядка тысячи гаусс.

Стандартные представления о меридиональной циркуляции Солнца предполагают существование простой структуры циркуляции крупномасштабного течения, состоящей из одной ячейки в северном и южном полушарии конвективной зоны соответственно. В каждой из ячеек течение направлено к полюсу у поверхности Солнца и обратно к экватору у дна конвективной зоны. Последние результаты гелиосейсмологии [4–6], показывают, что меридиональная циркуляция Солнца может иметь более сложную структуру, состоящую из двух и более ячеек на полушарие. Скорость меридиональной циркуляции является слабой по отношению к амплитуде конвективных течений, поэтому к результатам гелиосейсмологии следует относиться с осторожностью.

Структура циркуляции важна для некоторых сценариев солнечного динамо. В частности, экваториальная меридиональная циркуляция на дне конвективной зоны имеет критическое значение для сценария динамо по Бэбкоку–Лейтону. Поскольку меридиональная циркуляция играет важную роль в балансе потоков углового момента в конвективной зоне Солнца, возникает вопрос о совместимости многоячейковой структуры циркуляции с наблюдаемым профилем углового вращения Солнца.

Результаты численного моделирования [7] показали возможность объяснения многоячейковой структуры циркуляции для специально заданного распределения турбулентных источников дифференциального вращения Солнца. Считается, что основным турбулентным источником дифференциального вращения Солнца является Λ-эффект. Показано, что обратная ячейка циркуляции у экватора возникает при изменении знака радиальных кон-

вективных потоков углового момента Λ-эффектом с отрицательного (внутрь) на положительный (наружу). При этом профиль углового вращения Солнца остается в согласии с данными гелиосейсмологии.

Публикации:

1. Kitchatinov L.L., Olemskoy S.V. Dynamo model for grand maxima of solar activity: Can superflares occur on the Sun? // MNRAS. 2016. V. 459. P. 4353.

2. Кичатинов Л.Л. Неоднородность вращения вблизи поверхности Солнца как индикатор подфотосферных магнитных полей // Письма в АЖ. 2016. Т. 42. С. 379.

3. Kitchatinov L.L., Nepomnyashchikh A.A. Diamagnetic pumping in a rotating convection zone // Adv. Space Res. 2016. V. 58. P. 1554.

4. Rudiger G., Schultz M., Kitchatinov L.L. Instability of magnetized and differentially rotating stellar radiation zones with hugh magnetic Mach number // MNRAS. 2016. V. 456. P. 3004.

5. Pipin V.V., Kosovichev A.G. Angular momentum fluxes caused by Λ-effect and meridional circulation structure of the Sun // Adv. Space Sci. 2016. V. 58. P. 1490.

6. Pipin V.V., Kosovichev A.G. Dependence of stellar magnetic activity cycles on rotational period in a nonlinear solar-type dynamo // Astrophys. J. 2016. V. 823. P. 133.

7. Yokoi N., Schmitt D., Pipin V., Hamba F. A new simple dynamo model for stellar activity cycle // Astrophys. J. 2016. V. 824. P. 67.

Список использованных источников:

1. Stenflo J.O. Magnetic-field structure of the photospheric network // Solar Phys. 1973. V. 32. P. 41–65.

2. Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Динамика трубок магнитного поля в процессе формирования большого солнечного пятна // Астрон. журн. 2012. Т. 89, № 11. С. 967–975.

3. Harvey K., Harvey J. Observations of moving magnetic features near sunspots // Solar Phys. 1973. V. 28. P. 61–71.

4. Zhao J., Bogart R.S., Kosovichev A.G., Duvall T.L., Hartlep T. Detection of equatorward meridional flow and evidence of double-cell meridional circulation inside the Sun // Astrophys. J. 2013. V. 774. P. 29–34.

5. Kholikov S., Serebryanskiy A., Jackiewicz J. Meridional flow in the solar convection zone. I. Measurements from GONG data // Astrophys. J. 2014. V. 784. P. 145–156.

6. Rajaguru S.P., Antia H.M. Meridional circulation in the solar convection zone: time-distance helioseismic inferences from four years of HMI/SDO observations // Astrophys. J. 2015. V. 813. P. 114–123.

7. Pipin V.V., Kosovichev A.G. Angular momentum fluxes caused by Λ-effect and meridional circulation structure of the Sun // Adv. Space Res. 2016. V. 58. P. 1490–1503.

2.2. Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере

2.2.1. Получение новых знаний о характеристиках эруптивных процессов в атмосфере Солнца

2.2.1.1. Мощные солнечные вспышки: условия инициации и ускорения частиц

Как правило, микроволновое излучение начинается позже старта жесткого рентгеновского излучения. Однако иногда наблюдаются события, в которых ситуация обратная. Их анализ указывает на существование эффективных механизмов углового рассеяния ускоряемых электронов и на эффекты отражения нетепловых электронов в магнитных пробках, расположенных в основаниях вспышечных аркад.

Новые данные о процессах энерговыделения солнечных вспышек были получены при анализе наблюдений тонкой структуры микроволновых всплесков. Поскольку

частоты их излучения близки к собственным частотам плазмы в источнике и их гармоникам, то их регистрация является уникальной возможностью определения параметров плазмы: магнитного поля при излучении на циклотронной частоте или ее гармонике или плотности плазмы, если задающей частотой является ленгмюровская частота. Поэтому основное направление работ по этой теме — разработка методов идентификации механизма когерентного излучения в конкретных событиях. Новизна и уникальность этих исследований состоит в использовании двух типов данных: полученных на китайских спектрополяриметрах, регистрирующих тонкую структуру микроволновых всплесков, и изображений, полученных с помощью ССРТ, позволяющих локализовать источники во вспышечной области. Локализация источников позволила оценить плотность плазмы и величину магнитного поля независимо и, следовательно, верифицировать механизм излучения. В частности, для ряда событий удалось показать, что излучается обыкновенная мода электромагнитной волны, что существенно ограничивает круг возможных механизмов генерации тонкой структуры.

Особый интерес среди событий с тонкой структурой вызывают всплески III типа с разной направленностью частотного дрейфа. Противоположно дрейфующие ветви естественно связать с излучающими пучками электронов, распространяющимися вдоль магнитного поля от области ускорения. В этом случае стартовые частоты излучаются вблизи места ускорения. Поскольку частоты всплесков III типа близки к ленгмюровской частоте или ее гармонике, то по ее значению можно определить плотность плазмы в области ускорения.

Публикации:

1. Tsap Yu.T., Stepanov A.V., Kashapova L.K., Myagkova I.N., Bogomolov A.V., Kopylova Yu., Goldvarg T.B. Time delays in the nonthermal radiation of solar flares according to observations of the CORONAS-F satellite // Cosmic Res. 2016. V. 54. P. 285.

2. Chernov G., Sych R., Tan B., Yan Yi-Hua, Tan Cheng-Ming, Fu Qi-Jun, Karlický M., Fomichev V. Flare evolution and polarization changes in fine structures of solar radio emission in the 2013 April 11 event // Research in Astronomy and Astrophys. 2016. V. 16. id. 008.

3. Tan B.L., Karlický M., Mészárosová H., Kashapova L., Huang J., Yan Y., Kontar E.P. Diagnosing the Source Region of a Solar Burst on 26 September 2011 by using microwave type-III pairs // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 2407.

2.2.2. Получение новых знаний о природе колебательных процессов в короне

2.2.2.1. Разработка методов поиска и диагностики колебаний и волн в атмосфере активных областей

Впервые разработан новый метод регистрации низкоамплитудных поперечных колебаний корональных петель на двумерных изображениях солнечной поверхности. Метод основан на применении двумерного комплексного вейвлет-преобразования и позволяет усилить слабые квазипоперечные смещения контрастных деталей на изображениях. Тесты с использованием модельных данных показали эффективность, реалистичность и устойчивость метода. Усиление поперечных колебаний не зависит от периода колебаний в широком диапазоне периодов. Применение разработанной методики для работы с временными кубами изображений, получаемыми SDO/AIA, позволили улучшить детектирование низкоамплитудных колебаний корональных петель.

Развит метод эмпирической декомпозиции мод (метод EMD) для корректной работы с данными SDO/AIA в присутствии цветного шума среды распространения сигналов. Это позволило разделить вклад квазипериодических сигналов, присущих солнечной атмосфере и наложенного случайного фонового шума. Применение метода к солнечному УФ-излучению показало его шумовую природу в виде комбинации цветных шумов с различным спектральным индексом мощности. Показано, что для пятен энергия 3-минутных колебаний значительно выше соответствующего уровня шума.

Публикации:

1. Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Motion Magnification in Coronal Seismology // Solar Phys. 2016. V. 291, iss. 11. P. 3251–3267.

2. Kolotkov D.Y., Anfinogentov S.A., Nakariakov V.M. Empirical mode decomposition analysis of random processes in the solar atmosphere // Astron. Astrophys. 2016. V. 592, id. A153. 9 p.

2.2.2.2. Высотное распределение частоты отсечки

Магнитоакустические волны в атмосфере над пятном испытывают сильную дисперсию при распространении из подфотосферных слоев в корону. Их свойства сильно зависят от частоты обрезания, которая, в свою очередь, зависит от плазменных параметров среды распространения. Волны с частотой ниже частоты обрезания испытывают сильное затухание и не достигают верхних слоев солнечной атмосферы. Вследствие этого происходит фильтрация распространяющихся широкополосных импульсов по частоте и высоте.

Исследовалась пространственная модификация частоты отсечки волн, распространяющихся на различных высотах пятенной атмосферы [15]. Найдены значения пространственного распределения частоты отсечки на разных высотах в полярной системе координат для активных областей AR11131 (8 декабря 2010 г., симметричное пятно) и AR11330 (27 октября 2011 г., асимметричное пятно) с использованием PWF-анализа. Показано, что высокочастотные колебания до 3 мин в основном локализованы в тени пятна. Колебания с периодом 5 мин располагаются на границе тень/полутень, формируя кольцеобразный источник с резкими краями. По мере уменьшения частоты колебания образуют расширяющиеся структуры, совпадающие с пространственной формой тени. Использование зависимости частоты отсечки от наклона силовых линий позволило реконструировать одномерное распределение магнитного поля (рис. 10). Вычисленные значения углов наклона находятся в хорошем соответствии с параметрами экстраполированного магнитного поля. Разработанный метод является альтернативным для реконструкции поля и может быть применен для задания граничных и/или начальных условий при использовании обычных методов экстраполяции магнитного поля.

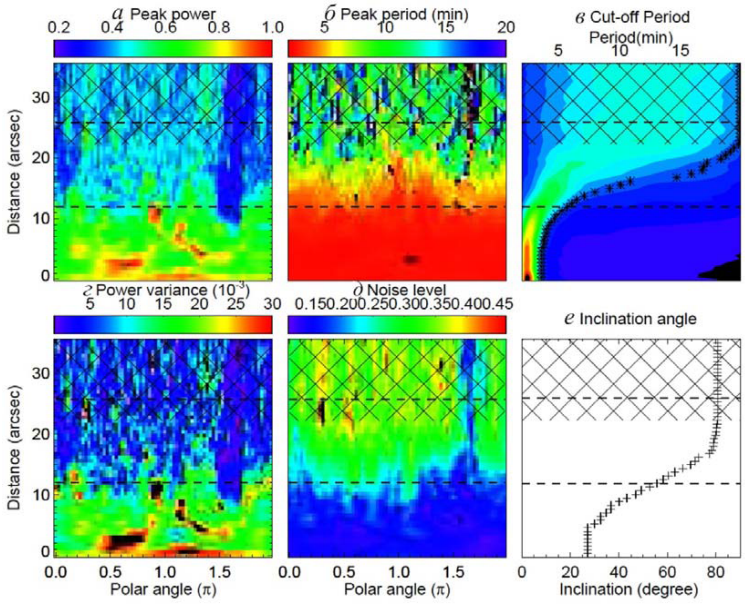


Рис. 10. Пространственное распределение колебаний в пятне (SDO/AIA, 304 Å, 8 декабря 2010 г.) в полярной системе координат: *а* — распределение пиковой мощности колебаний; *б* — распределение пикового периода; *в* — одномерное спектральное распределение мощности колебаний как функция расстояния до центра пятна и периода; звездочками показана граница частотного обрезания; *г* — распределение вариации мощности колебаний; *д* — распределение шума; *е* —одномерная реконструкция угла наклона магнитного поля; горизонтальными штриховыми линиями показаны границы тени и полутени пятна; штриховкой отмечена область низкой достоверности

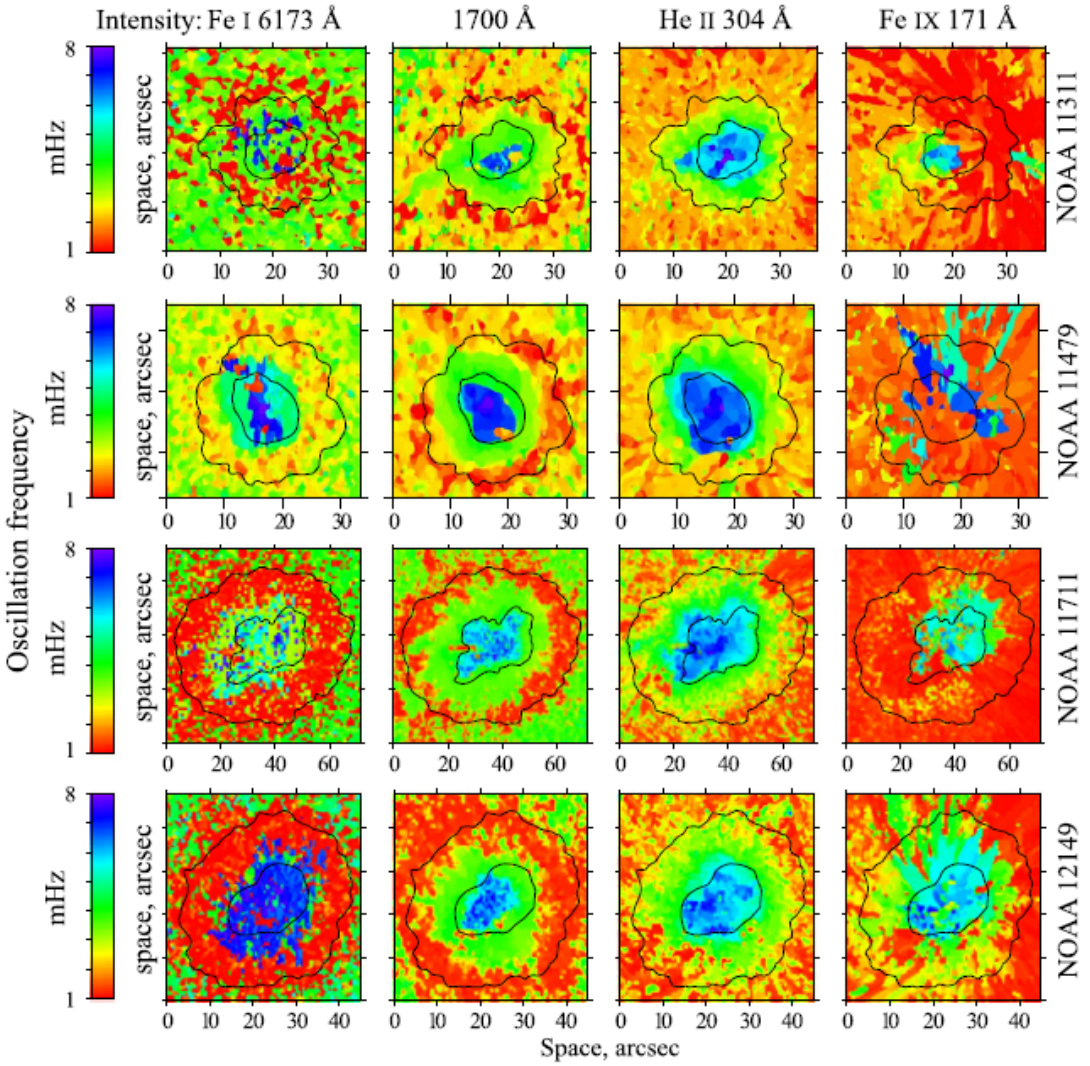


Рис. 11. Пространственное распределение доминирующих частот для четырех солнечных пятен на четырех высотных уровнях от глубокой фотосферы до короны. Черные замкнутые линии обозначают границы тени и полутени, наблюдаемые в непрерывном спектре

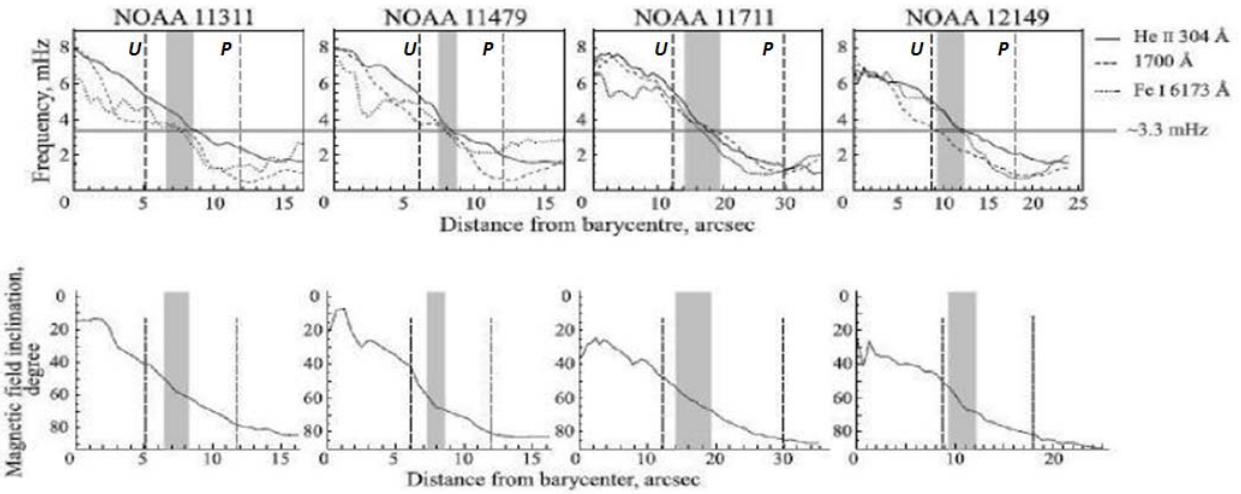


Рис. 12. Верхний ряд — радиальное распределение доминирующих частот для 4 пятен в интервале высот фотосфера — переходная зона vs дистанция от барицентра пятна. Нижний ряд — реконструированный наклон магнитного поля в переходной зоне (304 Å) vs дистанция от барицентра пятна. Серым цветом выделен участок внутренней полутени

Проведены расширенные исследования высотной стратификации пространственного распределения доминирующих частот в четырех солнечных пятнах (рис. 11, 12). Полученные результаты позволяют реконструировать топологию магнитного поля в переходной зоне, недоступной прямым измерениям магнитного поля. Сближение кривых в узкой кольцевой области внутренней полутени является новым (не отмечавшимся ранее) эффектом и указывает на преобладание пятиминутных колебаний на трех высотных уровнях, что свидетельствует в пользу распространения этих колебаний из фотосферы в переходную зону (рис. 12).

Публикации:

1. Sych R. MHD wave in sunspots // Low-Frequency Waves in Space Plasmas. Wiley, 2016. P. 467–487. (Geophys. Monograph Ser. V. 216).

2. Kolobov D.Y., Chelpanov A.A., Kobanov N.I. Peculiarity of the oscillation stratification in sunspot penumbrae // Solar. Phys. 2016. V. 291. N 11. P. 3339–3347.

2.2.2.3. Динамика волновой активности и ее связь со вспышками

Излучение от солнечных пятен в широком диапазоне частот характеризуется выраженной низкочастотной модуляцией 3-минутных колебаний в виде цугов. Показано, что 3-минутные колебания в радиоисточниках (NoRH, 17 ГГц) связанных с пятнами, имеют немонотонный характер. Существуют низкочастотные цуги колебаний с периодом ~8–20 мин. Интервал между цугами составляет ~13–60 мин. Выявлено, что цуги колебаний изменяются по мощности и частоте. Относительная амплитуда вариаций сигнала ~3–8 %. Наблюдаются выраженные частотные дрейфы сигнала в ходе развития отдельных цугов колебаний. Начало и конец дрейфов совпадают с началом и концом амплитудной модуляции. Обнаружено, что начало дрейфов связано с появлением тонкоструктурных осциллирующих деталей с максимальной мощностью в основаниях корональных арок. Показано, что период колебаний изменяется в диапазоне от 90 до 240 с возникновением позитивных и негативных дрейфов частоты. Скорость частотных дрейфов имеет тенденцию увеличиваться с высотой, достигая 4–5 мГц/ч в фотосфере, 5–8 мГц/ч в хромосфере и 11–13 мГц/ч в короне. На рис. 13 показан пример частотных дрейфов в радиодиапазоне.

Наблюдаемые пространственно-частотно-временные особенности колебаний можно интерпретировать в рамках двух работающих одновременно механизмов. Первый из них связан с дисперсионной эволюцией распространяющихся вверх вдоль магнитного поля пятна подфотосферных импульсов. Второй механизм связан с пространственным расщеплением распространяющихся импульсов по нескольким индивидуальным магнитным трубкам с различными физическими и геометрическими параметрами.

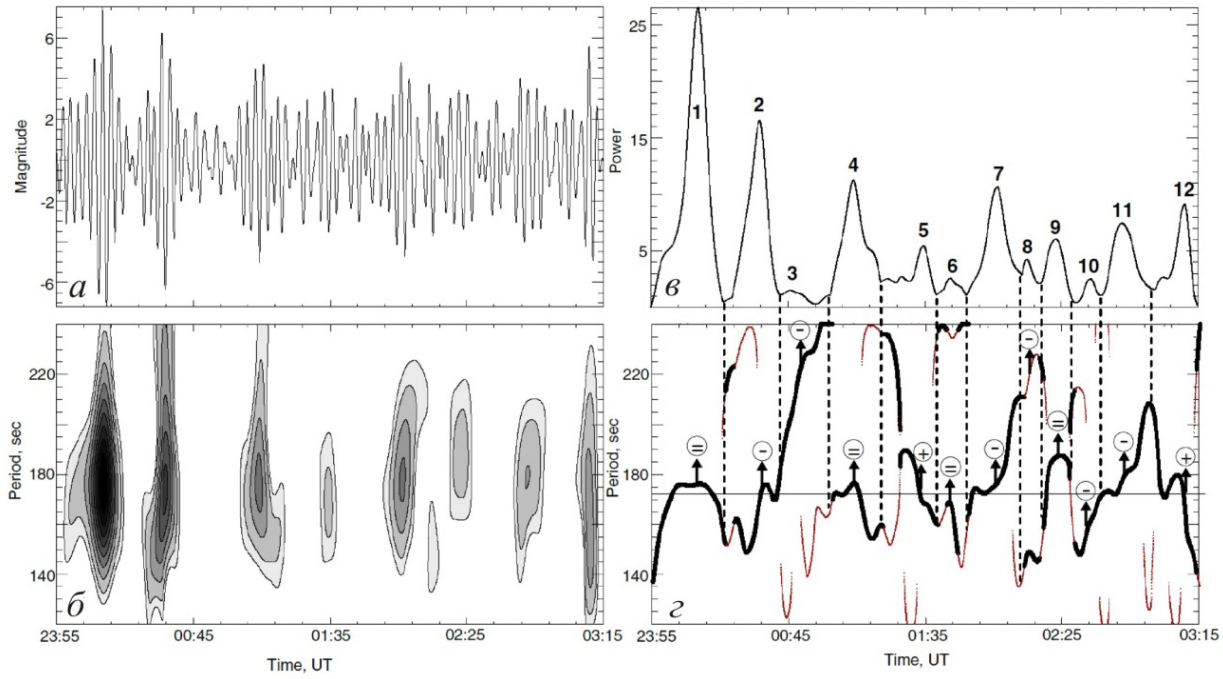


Рис. 13. Вейвлет-анализ временного профиля колебаний с 23:55 по 03:15 UT 03 мая 2005 г. в радиодиапазоне (NoRH, 17 ГГц): *а* — амплитудный профиль колебаний; *б* — распределение мощности пакетов волн в вейвлет-спектре; *в* — временной интегральный профиль мощности; цифрами указаны номера пакетов; *г* — вейвлет-скелетон с отрисовкой линий глобальных (жирные линии) и локальных (тонкие линии) экстремумов. В кружках указан знак дрейфа периодов: положительный (+), отрицательный (–) или без дрейфа (=)

Изучена пространственная динамика распространяющихся 3-минутных волновых фронтов во время развития цугов волн. Впервые обнаружено возникновение источников волн в виде спирали (рис. 14). Наблюдаемая спиральность характерна для всех высот атмосферы над пятном.

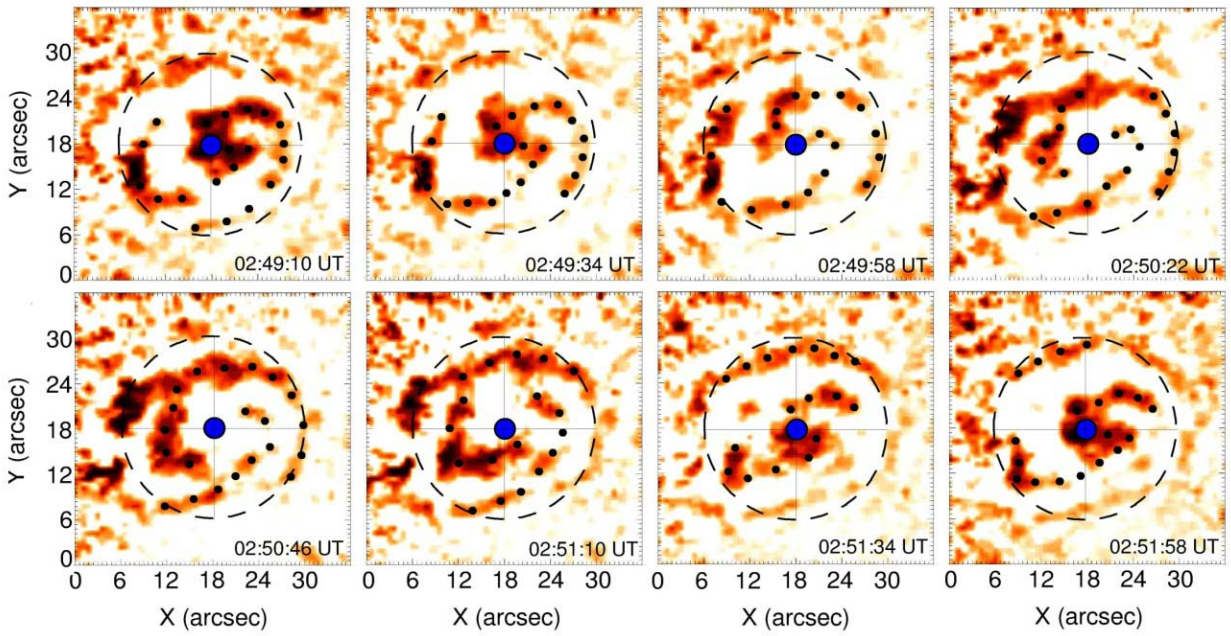


Рис. 14. Временная динамика узкополосных волновых фронтов на протяжении одного цикла 3-минутных колебаний в тени пятна на уровне переходной зоны (SDO/AIA 304 Å). Черными точками указаны гребни фронтов. Окружностью (штрихи) показана граница тени

Предполагается, что обнаруженная спиральность имеет проекционную природу, основанную на влиянии двух факторов: пространственного распределения магнитных волноводов в пятне и высоты генерации излучения. Основываясь на механизме частотного обрезания, можно сделать вывод, что этот механизм формирует отдельные узкополосные детали в полосе 3-минутных колебаний, совокупность которых определяет спиральную форму распространяющихся волн.

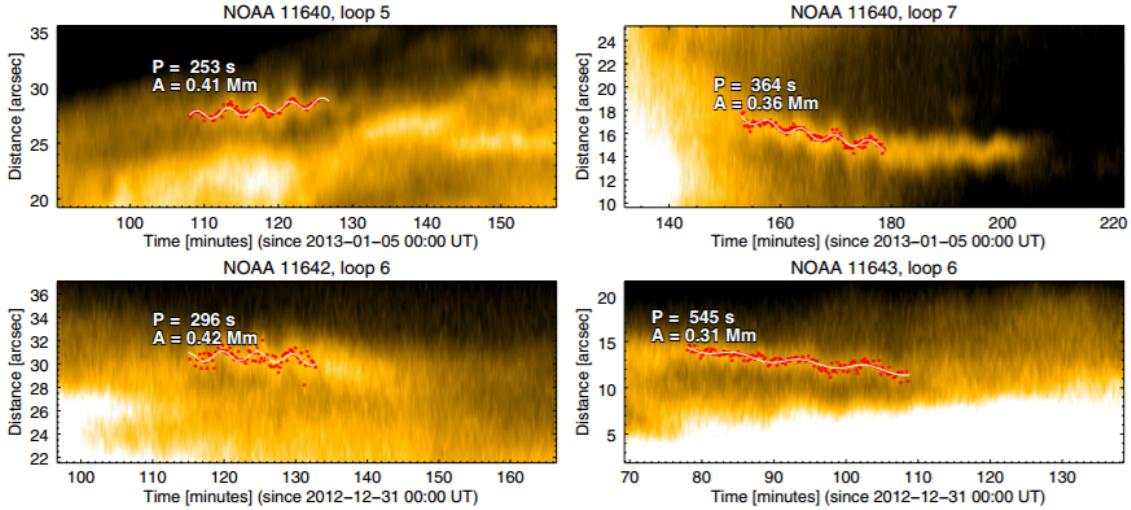


Рис. 15. Диаграммы координата–время колебаний корональных петель, найденных в активных областях

Обнаружено, что в короне наблюдаются сильные стоячие и распространяющиеся незатухающие колебания магнитных петель. Используя каталоги активных областей, полученных с высоким пространственным и временным разрешением инструмента SDO/AIA, найдено, что большинство зарегистрированных колебаний хорошо описываются гауссовыми и экспонентными профилями затухания, что согласуется с ранее развитой теорией о взаимодействии колебательных мод в магнитных петлях.

Для объяснения найденного феномена была развита модель, объясняющая появление незатухающих поперечных колебаний корональных петель эффектом негативного трения. Источником энергии являются внешние квазипостоянные сдвиги, вызванные супергрануляционными движениями вблизи оснований магнитных петель или потоками в короне. Эти взаимодействия можно описать с помощью уравнения Рэлея, с учетом свойств затухания и резонанса процессов, которые определялись эмпирически.

Дальнейшая работа в этом направлении связана с развитием теоретического описания кинк-моды колебаний магнитных петель, включающего в себя начальный гауссов режим затухания с добавлением асимптотического экспоненциального состояния. Исходя из экспериментального профиля затухания поперечных колебаний и с применением разработанного теоретического описания впервые получены отношения контраста плотности и ширины неоднородного слоя в петлях. Эту информацию можно использовать в дальнейшем для вычисления магнитного поля в корональных магнитных структурах.

Публикации:

1. Sych R. MHD Wave in Sunspots // Low-Frequency Waves in Space Plasmas. Wiley, 2016. P. 467–487. (Geophys. Monograph Series. V. 216).

2. Nakariakov V.M., Pascoe D.J., Sych R., van Driel-Gesztelyi L. Waves in the Solar Corona: From microphysics to macrophysics: Preface to Topical Issue // Solar Phys. 2016. V. 291, iss. 11. P. 3139–3142.

3. Nakariakov V.M., Anfinogentov S.A., Nisticò G., Lee D.-H. Undamped transverse oscillations of coronal loops as a self-oscillatory process // Astron. Astrophys. 2016. V. 591, id. L5. 4 p.

4. Pascoe D.J., Goddard C.R., Nisticò G., Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Damping profile of standing kink oscillations observed by SDO/AIA // Astronomy & Astrophys. 2016. V. 585, id. L6. 4 p.

5. Pascoe D.J., Goddard C.R., Nisticò G., Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Coronal loop seismology using damping of standing kink oscillations by mode coupling // Astronomy & Astrophys. 2016. V. 589, id.A136. 9 p.

2.2.2.4. Связь между волновой активностью и вспышками

Процесс энерговыделения не может начаться во всем объеме вспышки одновременно. Вначале вспышка локализована в малом объеме плазмы активной области. Затем процесс высвобождения и диссипации энергии начинает захватывать все новые площади активной области. Такой диссипативный процесс может вызываться внешними агентами в виде электронных пучков, ударных волн и распространяющихся волн. Была обнаружена связь между усилением волновой активности в пятнах и возникновением вспышек. Выявлено существование различных фаз волновой активности в пятенной атмосфере. В спокойной фазе имеет место непрерывное распространение из подфотосферных слоев в корону медленных магнитоакустических волн вдоль магнитных силовых трубок (часто с открытой конфигурацией). Источники колебаний совпадают с основаниями корональных арок, заякоренных в тени пятна. В активной фазе обнаружено значительное нарастание мощности осцилляций с периодами ~2–4 мин в микроволновом и ультрафиолетовом излучении. Обнаружено возникновение пиковых по мощности колебаний за ~20–30 мин до начала вспышечного энерговыделения. Для этой фазы характерно появление V-образных источников колебаний (волновых следов) в тени пятна. Направление распространения волн совпадает с положением источника вспышки. Установлено, что медленные низкочастотные МГД-волны, распространяющиеся из пятен, могут трансформироваться в поперечные высокочастотные колебания и инициировать начало вынужденного пересоединения в магнитных структурах. Показано, что волны могут быть как триггером вспышек, так и, по мере движения усилившегося волнового потока по магнитному волноводу в область источника вспышки, модулятором излучения. Выявлен дополнительный нагрев плазмы с образованием плоских участков на профиле потока в мягком рентгене на стадии спада.

Публикации:

1. Sych R. MHD Wave in Sunspots // Low-Frequency Waves in Space Plasmas. Wiley, 2016. P. 467–487. (Geoph. Monograph Ser. V. 216).

2.2.2.5. Модельные расчеты колебаний в пятнах

Исследовались импульсивно генерируемые магнитоакустические волны в солнечной атмосфере, распространяющиеся вдоль вертикальных линий магнитного поля в тени солнечных пятен. С использованием численных методов для решения магнитогидродинамических (МГД) уравнений и фурье-анализа профилей волн были оценены периоды волн и найдены зависимости при их распространении в вертикальном и горизонтальном направлениях. Полученные значения периодов показывают значительные вариации с высотой и расстоянием от центра пятна, что указывает на взаимодействие магнитоакустических волн с неоднородной средой пятенной атмосферы. Вывод: градиенты плотности и давления среды распространения волн играют важную роль во взаимодействии волн и изменениях периода их колебаний. Результаты вычислений позволили определить основные параметры волн и дать пространственную привязку к выделенным магнитным структурам, вдоль которых происходит распространение. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с наблюдательными данными.

Публикации:

1. Chmielewski P., Murawski K., Sych R. Spatial variation of wave periods of magnetoacoustic-gravity waves in the flux-tube // Acta Physica Polonica B. 2016. V. 47, iss. 10. P. 2273.

2.2.3. Исследования волновых процессов в нижней солнечной атмосфере по вариациям доплеровской скорости, ширины профилей спектральных линий и интенсивности в видимом и ИК-диапазонах, оценки современных полуэмпирических моделей солнечной атмосферы на базе расчета функций отклика сильных спектральных линий на возмущения физических условий

2.2.3.1. Периодические вариации профилей спектральных линий в корональных дырах

Нагрев верхней хромосферы и солнечной короны — одна из самых актуальных и в то же время самых давних проблем физики Солнца. К настоящему времени наибольшее распространение получили две гипотезы: 1) нагрев волнами, 2) пересоединение магнитных петель. В принципе, допускают и их совместное действие. Например, пересоединение может возникать при сближении двух противофазно колеблющихся петель разной полярности. На условия распространения волн в солнечной атмосфере сильное влияние оказывают солнечные магнитные поля. Среди магнитных структур выделяются три наиболее изучаемых: 1) солнечные пятна, 2) факельные области, 3) корональные дыры (КД). Эти структуры различаются как величиной напряженности магнитного поля, так и его топологией. Исследования колебательных процессов в каждой из этих структур имеют свою специфику. Очевидно, что особое внимание следует уделить альфвеновским волнам, которые отличаются слабым затуханием и вследствие этого способны распространяться на значительные расстояния. Ранее многими исследователями было показано, что альфвеновские волны могут не только снабжать энергией потоки солнечного ветра, но и переносить энергию достаточную для нагрева солнечной короны. В нижних слоях исследователи часто ищут признаки торсионных альфвеновских волн по наблюдениям периодических колебаний ширины профиля спектральной линии. При этом следует быть уверенным, что наблюдаемый эффект не вызван температурными осцилляциями. Солнечных хромосферных линий, доступных наземным наблюдениям, не так много, и поэтому большая часть наблюдений, посвященных поиску торсионных альфвеновских волн в хромосфере, выполнена в линиях Hα и CaII 8542. В одной из наших работ были выявлены периодические колебания ширины профиля Hα в 10 временных сериях по наблюдениям 7 КД. По основным параметрам (амплитуда, период) наши измерения совпали с результатами [27]. Но если Джесс с соавторами проводили наблюдения в компактных структурах (менее 1″) с сильным вертикальным стационарным течением ~20 км/с, то наши измерения относились к произвольно выбранным участкам внутри КД, с худшим пространственным разрешением (около 1.5–2). Если рассматривать вертикальное стационарное течение как необходимое условие для образования торсионных альфвеновских волн, то такое совпадение результатов должно настораживать, поскольку наши наблюдения не были связаны с сильными стационарными течениями. Нельзя исключать возможность того, что мы столкнулись с какой-то пока слабо изученной особенностью поведения Hα. В связи с этим мы задались целью — проверить, не обнаруживается ли сходное поведение в других спектральных линиях, принадлежащих хромосфере и верхней фотосфере. Для этого мы исследовали временные вариации контуров двух новых для нас спектральных линий. Первая из них — линия BaII 4554 Å — представляет верхнюю фотосферу (зону температурного минимума). Эта спектральная линия играет важную роль в звездной спектроскопии, являясь одним из ключевых элементов ядерного синтеза. Вторая — линия инфракрасного дублета CaII 8542 Å. Высота образования последней близка к Hα и, по разным оценкам, составляет 1000–1500 км.

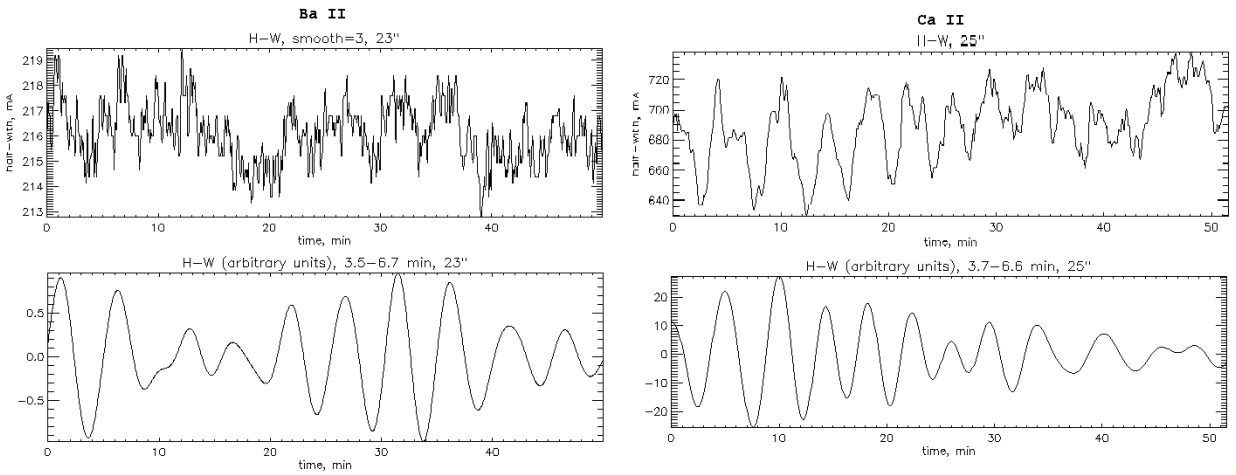


Рис. 16. Вариации полуширины линии BaII (левые панели) и линии CaII (правые панели). Вверху — оригинальные временные серии. Внизу — отфильтрованные с периодом 5 мин

Анализ временных серий выявил четкие колебания полуширины профилей выбранных спектральных линий (рис. 16). Максимальные колебания (peak-to-peak) полуширины профиля для разных временных серий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Вариации полуширин CaII (№ 1–5) и BaII (№ 6–9) в 4-частотных интервалах

	Максимальный размах колебаний полуширины профиля линии (peak-to-peak), мÅ			
№	0.2–0.7 мГц (26-, 70-минутные)	1–2 мГц (10-, 15-, 17-минутные)	2.5–4.5 мГц (5-минутные)	4.5–7.5 мГц (3-минутные)
1	–	50 (3.3)*	45 (2.6)	45 (3.1)
2	–	50 (1.8)	–	40 (2.5)
3	–	–100 (2.1)	70 (3.7)	70 (3.5)
4	–	30 (1)	60–80 (2.4)	60 (2.9)
5	70 (1.4)	–	35–40 (0.9)	40–45 (0.9)
6	–	3 (0.45)	3–4 (0.4)	–
7	–	–	4 (0.42)	–
8	–	6 (0.38)	3 (0.56)	–
9	8 (0.52)		5 (0.36)	–

*в скобках указана средняя амплитуда колебаний яркости, %.

Величина наблюдаемых колебаний значительно превосходит значения тепловых уширений, рассчитанных на основе измеренных осцилляций интенсивности, что ставит под сомнение их тепловое происхождение. Однако однозначному объяснению этих колебаний исключительно проявлениями торсионных альфвеновских волн препятствует два наблюдательных факта. Во-первых, наблюдения не показывают четко выраженного эффекта центр–лимб. Во-вторых, колебания наблюдаются как в областях стационарных течений, так и вне их. Это приводит к предположению и о других возможных механизмах наблюдаемых периодических уширений. Выявление этих механизмов может стать темой будущих исследований.

Публикации:

1. Kobanov N.I.; Chupin S.A.; Kolobov D.Yu. Periodic variations of the BaII 4554 Å and CaII 8542 Å line profiles in coronal holes // Astronomy Lett. 2016. V. 42, N 1. P. 55–62.

2.2.3.2. Исследование формы контуров линии K CaII и динамических процессов в солнечной хромосфере в основании корональной дыры

Линия K CaII является прекрасным инструментом для одновременного исследования солнечной атмосферы на большом интервале высот. Ядро этой линии — K_3 — образуется в средней хромосфере, близкие крылья K_{2v}, K_{2r}, а также K_{1v}, K_{1r} дают возможность исследовать более низкие уровни атмосферы. Физические условия в этих слоях в значительной степени определяются магнитогидродинамическими процессами, что, в свою очередь, находит отклик в линии CaII, а точнее, в форме ее контура.

Новые результаты были получены при исследовании контуров линии K CaII в структурных образованиях спокойной хромосферы и флоккулах [29]. Использованы наблюдения двух временных серий для двух областей в основании корональной дыры.

Для количественного анализа формы контуров использовался набор параметров контура, в который входили интенсивность в центре линии, K-индекс; интенсивности фиолетового и красного пиков, минимальная интенсивность в фиолетовом абсорбционном крыле линии K CaII.

С целью исследования колебательного процесса для каждого из параметров в каждом пространственном пикселе был выполнен спектральный анализ в нескольких диапазонах частот. В качестве метода использовался корреляционный периодограммanализ. Этот метод предпочтителен, когда временная последовательность коротка или в последовательности имеются неравноотстоящие точки. Для исследования были выбраны диапазоны частот, относящиеся к 3-, 4-, 5-минутным, длиннопериодным колебаниям и полному доступному диапазону частот 1.1–16.0 мГц.

Кроме перечисленных выше параметров, для анализа колебательных процессов на разных высотах в солнечной атмосфере были использованы центральные интенсивности двух фотосферных спектральных линий (бленд) в крыле линии H CaII, CrI (396.36900 нм) и FeI (396.60617 нм). Ядра этих линий, по данным ряда авторов, образуются на высотах 250 км и 450 км соответственно.

Исследовались следующие хромосферные структуры: *ne* — усиленная сетка; *n* — сеточные дорожки спокойного Солнца; *c* — участки между сеточными элементами спокойного Солнца; *x* — участки промежуточной яркости по отношению к участкам *n* и *c*; *f* — границы всех перечисленных участков; *p* — участок пониженной яркости в области S25W12; *b* — флоккул.

На рис. 17 приводится контур линии K CaII, принадлежащий центральной части участка пониженной яркости *p*. Для этого участка характерна беспиковая форма контура линии.

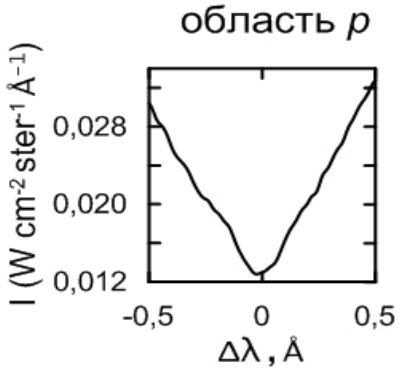


Рис. 17. Контур линии, принадлежащий центральной части участка пониженной яркости *p* области S25W12

На рис. 18 приводятся примеры временных вариаций контуров линии K CaII в различных хромосферных структурах для двух исследованных областей.

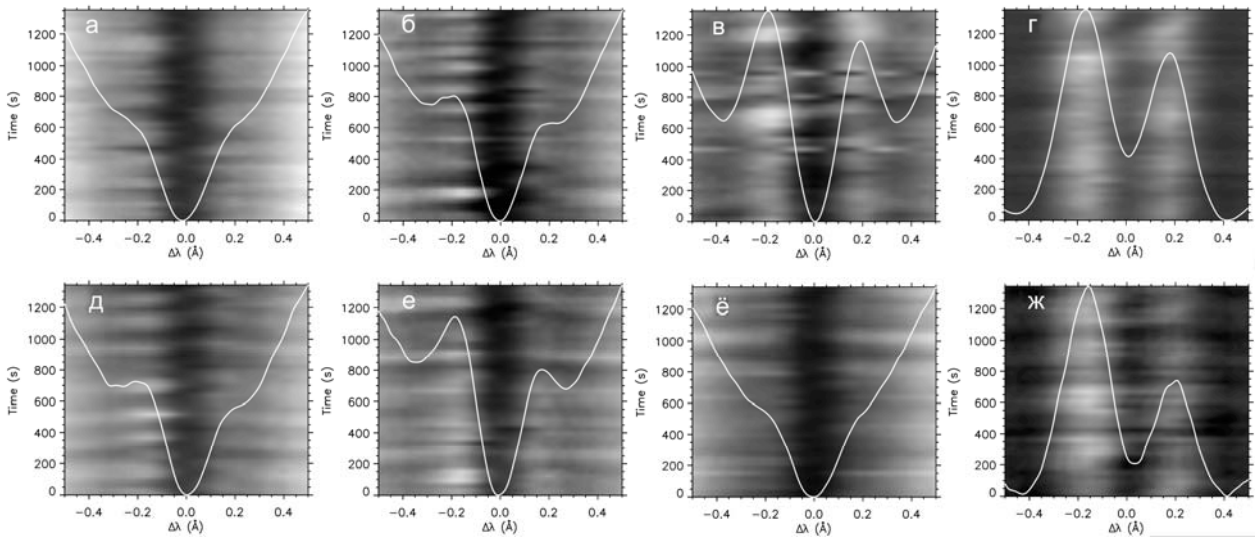


Рис. 18. Примеры временных вариаций контуров линии K CaII для двух областей S25W17 (левые панели) и S25W12 (правые панели): *а* — ячейка; *б* — сетка; *в* — усиленная сетка; *г* — флоккул; *д* — ячейка; *е* — сетка; *ё* — участок пониженной яркости; *ж* — флоккул. Сверху на полутоновые изображения нанесены усредненные по времени контуры линии K CaII для этих пространственных участков (белые кривые)

Для сравнения спектральной мощности колебаний на разных уровнях солнечной атмосферы были выбраны пять параметров: I_{K3}, I_{K2v}, I_{K1v}, I_{FeI}, и I_{CrI}. Предположительно, первый параметр относится к средней хромосфере; второй — к нижней хромосфере; третий параметр относится к району температурного минимума, а четвертый и пятый — к фотосфере.

Рисунок 19 иллюстрирует вариации интегральной спектральной мощности с высотой в исследуемых полосах частот для выбранных структур и для всей области пространства, вырезанной щелью спектрографа.

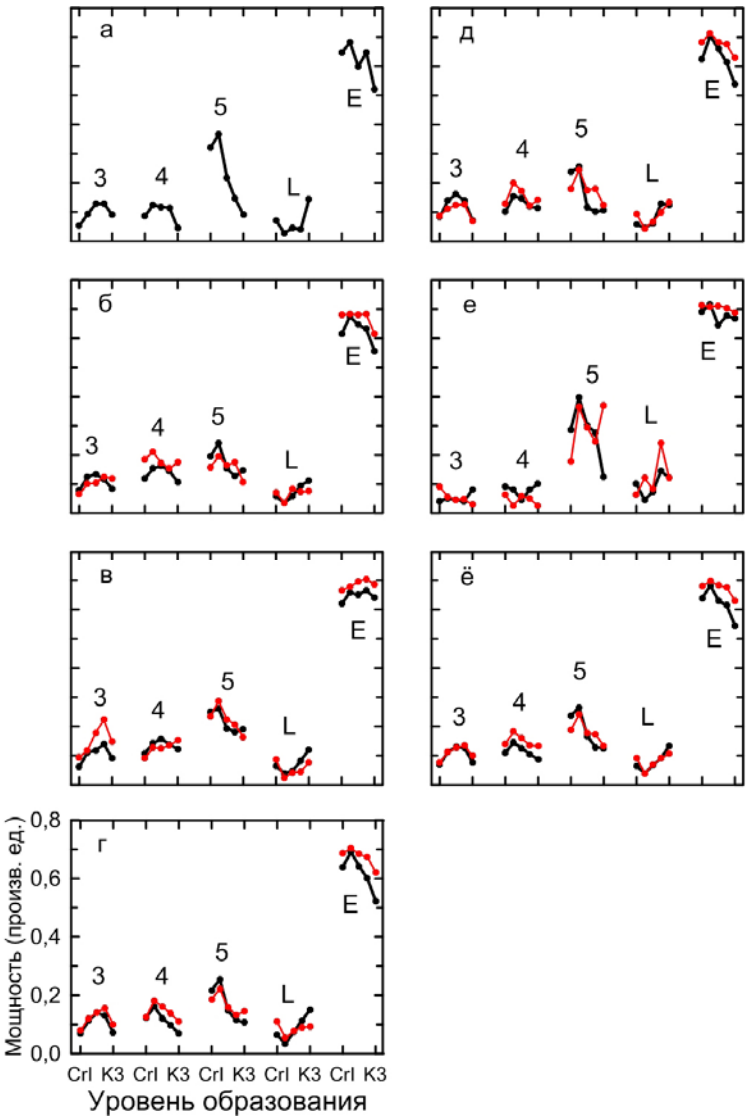


Рис. 19. Изменение с высотой интегральной спектральной мощности для индивидуальных хромосферных структур и для всего исследованного участка хромосферы в областях S25W17 (красные кривые) и S25W12 (черные кривые): *а* — для области с меньшей яркостью *p*; *б* — для ячейки *c*; *в* — для участка с промежуточной яркостью *x*; *г* — для границ всех структур *f*; *д* — для сетки *n*; *е* — для флоккула *b*; *ё* — для всей исследуемой области хромосферы. Параметры I_{CrI}, I_{FeI}, I_{K1v}, I_{K2v} и I_{K3} используются в качестве маркеров высоты от фотосферы до нижней и средней хромосферы. Цифрами и буквами обозначены диапазоны периодов: 3 — 3-минутный диапазон; 4 — 4-минутный диапазон; 5 — 5-минутный диапазон; L — длиннопериодные колебания; E — полный диапазон периодов, соответствующий диапазону частот 1 — 16.0 мГц

В результате исследования было показано, что в каждой хромосферной структуре есть участки, на которых сохраняется одна и та же форма контуров линии K CaII на пространственной шкале приблизительно 4″. Это относится и к спокойной области, и к районам флоккулов в основании корональной дыры. Присутствие в хромосфере участков пониженной температуры было подтверждено беспиковой формой контуров на обширном участке пониженной яркости области S25W12. Минимальный временной интервал, на котором можно зафиксировать изменения контура линии K CaII, был ограничен каденцией наблюдений и составлял 30 с. Эта величина не противоречит измерениям и 3D-модельным расчетам других авторов для хромосферы.

Оказалось, что имеется тенденция уменьшения интегральной спектральной мощности с высотой на интервале от температурного минимума до средней хромосферы в 4-минутной, 5-минутной и полной полосах частот. В 3-минутной полосе мощность

колебаний уменьшается в интервале высот от нижней до средней хромосферы. Мощность длиннопериодных колебаний демонстрирует тенденцию роста, начиная с уровня температурного минимума.

Наблюдения не подтвердили преобладание 3-минутных колебаний на участках ячейки и 5-минутных колебаний — на участках сетки. Картина распределения интегральной спектральной мощности в рассматриваемых диапазонах частот в различных хромосферных структурах значительно сложнее. Самая высокая мощность колебаний в средней хромосфере чаще наблюдается не в центре структуры, а на ее границах. Дальнейшая работа в этом направлении связана как с привлечением дополнительного наблюдательного материала, так и с использованием расширенного набора параметров контуров линий.

Публикации:

Grigoryeva S.A., Turova I.P., Ozhogina O.A. Studying CaII K line profile shapes and dynamic processes in the solar chromospheres at the base of a coronal hole // Solar Phys. 2016. V. 291, iss. 7. P. 1977–2002.

2.2.3.3. Зависимость характеристик колебаний в факелах от напряженности магнитного поля

В магнитных узлах присутствуют 3-минутные колебания продольного магнитного поля, которые не наблюдаются в областях с умеренным магнитным полем.

В колебаниях интенсивности и лучевой скорости нижней фотосферы (линия FeI 6173 Å) не наблюдается отличий в спектральном составе в различных частях факела. Однако как в интенсивности, так и в скорости мощность колебаний в магнитных узлах ослаблена по сравнению с остальными областями факелов.

В переходной области низкие частоты сильнее выражены на периферии факелов; на этой высоте линии магнитного поля уже не вертикальны на всей площади факелов: появляется наклон, причем он больше проявляется на периферии, что позволяет распространяться колебаниям с более низкими частотами. Это подтверждает более ранние выводы о том, что в областях с вертикальным магнитным полем распространяются преимущественно высокочастотные колебания, а чем больше наклон линий магнитного поля, тем более низкие частоты наблюдаются.

Публикации:

Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. Influence of the magnetic field on oscillation spectra in solar faculae // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3329–3338.

2.2.3.4. Исследование движений и колебаний в солнечных волокнах перед их эрупцией

Исследованы доплеровские движения в волокне и в фотосфере под волокном за несколько дней до эрупции. Большое волокно в северном полушарии с 31 августа по 2 сентября 2014 г. располагалось вблизи центрального меридиана и эруптировало 02.09.2014. На Горизонтальном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории (ССО) в течение трех дней (31.08–2.09.2014) выполнены наблюдения волокна в спектральной области, которая включает линии Hβ λ 486.1 нм (хромосфера) и FeI λ 485.9 нм (фотосфера). Для исследования волокна также использованы Hα-изображения сети GONG и изображения с прибора AIA обсерватории SDO (Solar Dynamic Observatory), представленные в виде фильмов, магнитограммы с прибора HMI обсерватории SDO. Из анализа доплеровских скоростей в волокне и в фотосфере под волокном получены следующие результаты. Сильные вращательные движения присутствуют в волокне длительное время (весь период

наблюдений — 3 дня). После всплытия новых магнитных потоков вблизи волокна нарушается согласованность стационарных движений между фотосферой и волокном. За несколько часов перед эрупцией большие сегменты волокна совершают почти вертикальные колебания с периодом около 5 мин. Эти колебания имеют цуговый характер, схожий с пятиминутными фотосферными колебаниями.

Публикации:

Mashnich G.P., Bashkirtsev V.S. Motions and Oscillations in a Filament Preceding its Eruption // Astronomy Reports. 2016. V. 60, N 2. P. 287–293.

2.2.3.5. Исследование необычного события в тени пятна, наблюдавшегося 12.07.2014. Морфологическое описание пространственного строения тени исследуемого пятна

На горизонтальном солнечном телескопе ССО 12.07.2014 были получены спектрограммы пятна NOAA12109 в двух спектральных диапазонах — области ультрафиолетового дублета и инфракрасного триплета CaII. В тени пятна наблюдалось необычное явление — участок повышенной яркости, напоминающий световой мост, но «круглой» формы, без выхода в полутень. В результате первичной обработки получены изображения этого пятна в ультрафиолетовом и инфракрасном континуумах и в нескольких линиях. Построены карты доплеровских скоростей по ИК- и УФ-линиям. Обнаружено, что это образование (условно его можно назвать «круглым световым мостом») выглядит по-разному как в линиях, так и в континуумах. Можно видеть, что на изображении в ИК-континууме оно представляет собой пятно (рис. 20, *б*), а в УФ-континууме образование имеет кольцеобразную форму (рис. 20, *в*). Выявленная особенность требует дальнейшей интерпретации.

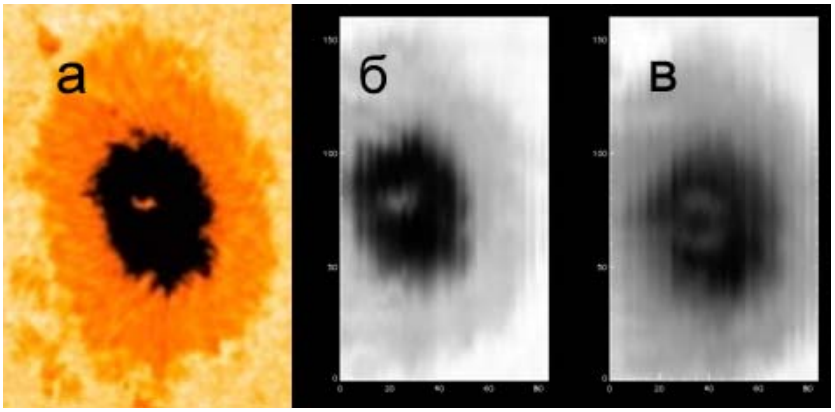


Рис. 20. Пятно NOAA 12109: *а* — по данным SDO HMI Intensitygram-Flattered; *б* — изображение, построенное по ИК-континууму; *в* — изображение, построенное по УФ-континууму

2.2.3.6. Тестирование пакета программ для вычисления функций отклика интенсивностей линий CaII на возмущения температуры с использованием современных моделей солнечной хромосферы

Выполнено тестирование вычислений ряда физических величин и их производных по температуре, входящих в пакет программ для вычисления функций отклика интенсивностей линий CaII на возмущение температуры в солнечной атмосфере. В качестве тестовой модели используется модель среднего спокойного Солнца VAL3C. В процессе отладки внесены некоторые изменения в вычислительные программы. Протестированы вычисления следующих величин:

1) постоянные затухания и их производные для 5 уровней CaII;

2) производные скоростей столкновительных переходов для столкновений с электронами и атомами водорода для 5 уровней CaII, включая переходы тонкой структуры;

3) производные электронной концентрации;

4) параметры для вычисления функции Фойгта, функция Фойгта, а также их производные;

5) производные населенностей 5 уровней CaII в предположении ЛТР;

6) производные коэффициента, учитывающего резонансное частичное перераспределение по частотам как в предположении ЛТР, так и при отсутствии ЛТР, для 5 линий CaII;

7) коэффициенты селективного поглощения для 5 линий CaII для случая сильной линии, т. е. без учета непрерывного поглощения в частотах линии.

2.2.4 Мониторинг Солнца в оптическом диапазоне, расширение баз данных

В течение ежегодного наблюдательного периода (с апреля по октябрь) четыре группы исследователей по графику выполняли собственные программы наблюдений на Автоматизированном солнечном телескопе (АСТ) Саянской солнечной обсерватории. Тип наблюдений — спектрофотометрия, реже — спектрополяриметрия. Объекты — солнечные пятна, поры, факельные области, корональные дыры, волокна и невозмущенные области. Ниже приведены сводная таблица проводимых наблюдений и отдельные примеры первичных наблюдательных данных.

Таблица 2. Сводная таблица наблюдений

Наблюдения на АСТ					
		2014	2015	2016	Итого
Пятно	Hα, HeI 10830 Å, SiI 10827 Å, BaII 4554 Å, FeI 5250 Å, FeI 6302 Å, 15648 Å	50c + 46	75c + 30	33c + 16	158c + 92
Факел	Hα, HeI 10830 Å, SiI 10827 Å, BaII 4554 Å, CaII (3934 Å, 3968 Å, 8498 Å, 8542 Å)	3c + 30	3c + 39	27	6c + 96
Волокно	Hβ 4862 Å, FeI 4859 Å	6	11	26	43
КД	Hα, HeI 10830 Å, SiI 10827 Å, BaII 4554 Å, CaII (3934 Å, 3968 Å, 8498 Å, 8542 Å), FeI 5250 Å	5	1c + 19	1c + 17	2c + 41
Спок. обл.	CaII (3934 Å, 3968 Å, 8498 Å, 8542 Å), FeI 6301 Å, FeI 6302 Å, 15648 Å	5	4c	3	4c + 8

*c — «быстрый скан» (двумерная временная серия)

Общее число временных серий — 451.
Общая длительность — 548 ч.
Средняя длительность серии — 73 мин.

Кроме того, были проведены дополнительно калибровочные, методические наблюдения общей длительностью около 100 ч. Ниже приведены примеры получаемых данных (рис. 21, 22).

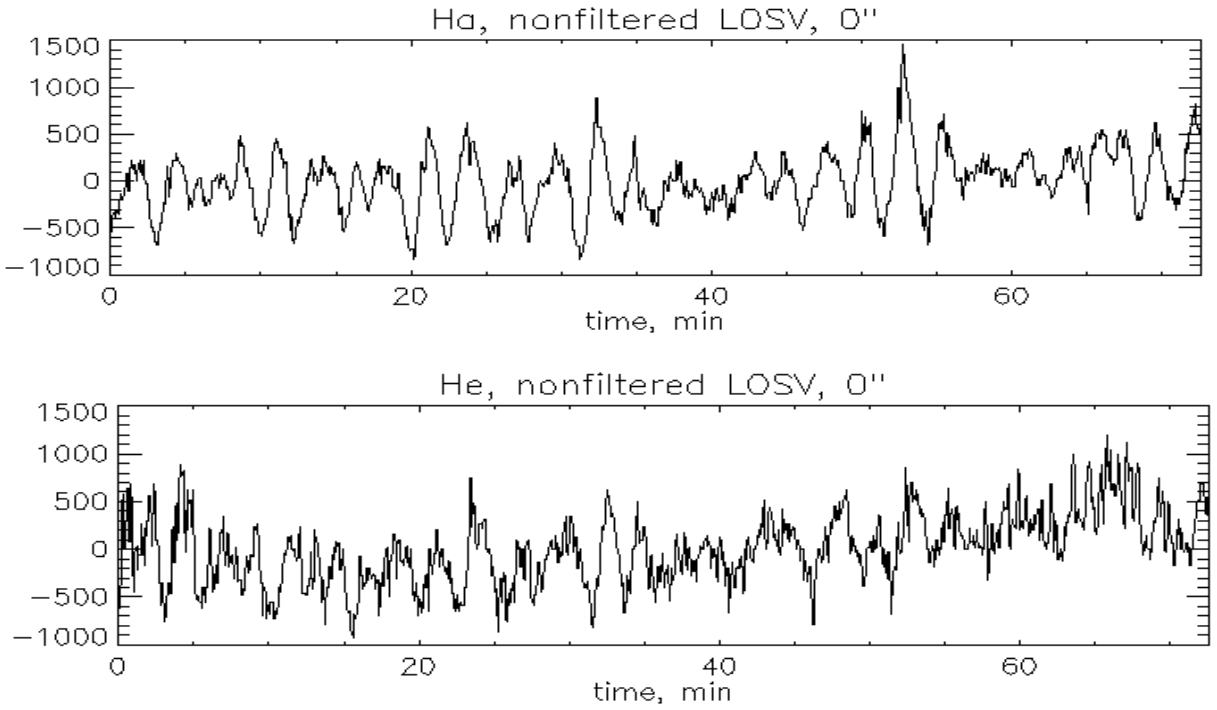


Рис. 21. Первичные временные серии одновременных наблюдений лучевых скоростей в спектральных линиях Hα и He 10830 Å

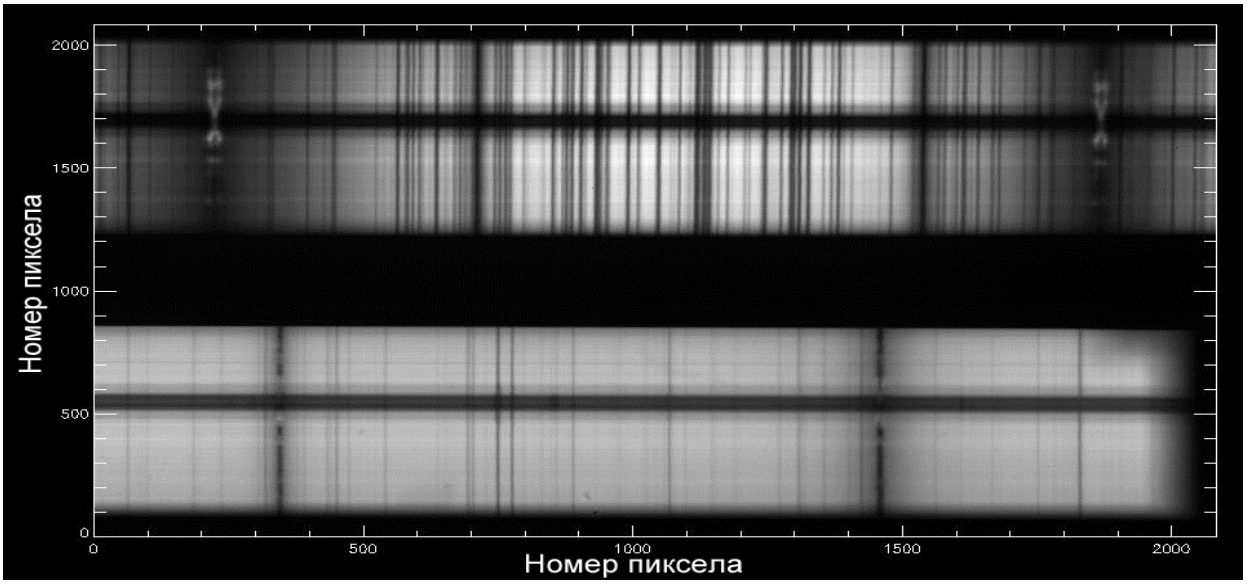


Рис. 22. Наблюдения солнечного пятна. Спектрограмма в области линий CaII: 3934 Å, 3968 Å (верхняя панель); 8498 Å, 8542 Å (нижняя панель)

2.3. Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца

2.3.1. Физические процессы в солнечных вспышках и солнечных активных областях

2.3.1.1. Оптические исследование процессов, происходящих в солнечных вспышках

На Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) проведены спектрополяриметрические наблюдения активных образований на Солнце в линиях железа 5250 Å и в ин-

тервале длин волн 4938–4946 Å с одновременными снимками в белом свете групп солнечных пятен.

Продолжалось исследование ударной линейной поляризации в солнечных вспышках, основанное на спектрополяриметрических наблюдениях на БСВТ. Поскольку с 2008 г. на БСВТ были изменены условия наблюдения (получена крупногабаритная ПЗС-камера, стали использовать два камерных зеркала), мы подвели итог исследования ударной поляризации по данным до 2008 г.

Были вновь обработаны данные по 24 солнечным вспышкам, имеющим рентгеновские классы C, M и X (2 вспышки). Оказалось, что свидетельства ударной поляризации имеют место только в 5 из них.

Наибольший интерес представляют две особенности проявления ударной поляризации во вспышках, полученные в результате этих исследований.

1. В двух подножиях одной вспышечной петли или аркады петель поведение профилей интенсивности линии Hα и профилей параметров Стокса различается.

2. В линии Hα впервые обнаружено изменение знака параметра Стокса не только поперек вспышечной ленты, но и с глубиной хромосферы.

2.3.1.2. Ударная поляризация в солнечных вспышках

Проведено исследование ударной линейной поляризации линии Hα в солнечных вспышках рентгеновских классов C, M и X (две вспышки), наблюдавшихся на Большом солнечном вакуумном телескопе. Из 32 обработанных вспышек только в 13 были обнаружены свидетельства ударной поляризации. Были проанализированы причины частого (или типичного, как указывают некоторые исследователи) отсутствия линейной поляризации хромосферных линий во вспышках. Так, причиной реального отсутствия поляризации может быть изотропизация функции распределения частиц по скоростям в пучке при внедрении его в плотные слои хромосферы. Кроме того, в случае наличия поляризации во вспышках показаны причины, затрудняющие ее обнаружение из-за условий наблюдения. Одной из основных особенностей наблюдения ударной линейной поляризации является то, что наиболее результативными с точки зрении ее обнаружения представляются наблюдения вспышек, расположенных ближе к солнечному лимбу. К числу трудностей обнаружения поляризации относится также кратковременность этого явления (поляризация возникает в основном в начале вспышки), влияние инструментальной поляризации и градиента интенсивности. Важно также высокое пространственное разрешение.

Вновь полученные данные подтвердили, что величина линейных параметров Стокса в основном составляет 2–7 %, а пространственные размеры узлов вспышки с ненулевыми значениями параметров Стокса составляют 1–2″. Наибольшая величина параметров Стокса (до 15 %) наблюдалась в области 6″ и была получена в том случае, когда профиль интенсивности линии Hα имел самообращение в центре. На рис. 23 показаны профили интенсивности линии Hα (вверху) и соответствующие им профили параметров Стокса (внизу) в двух лентах одной вспышки, полученные одновременно. По горизонтальной шкале отложена длина волны с 0 в центре линии.

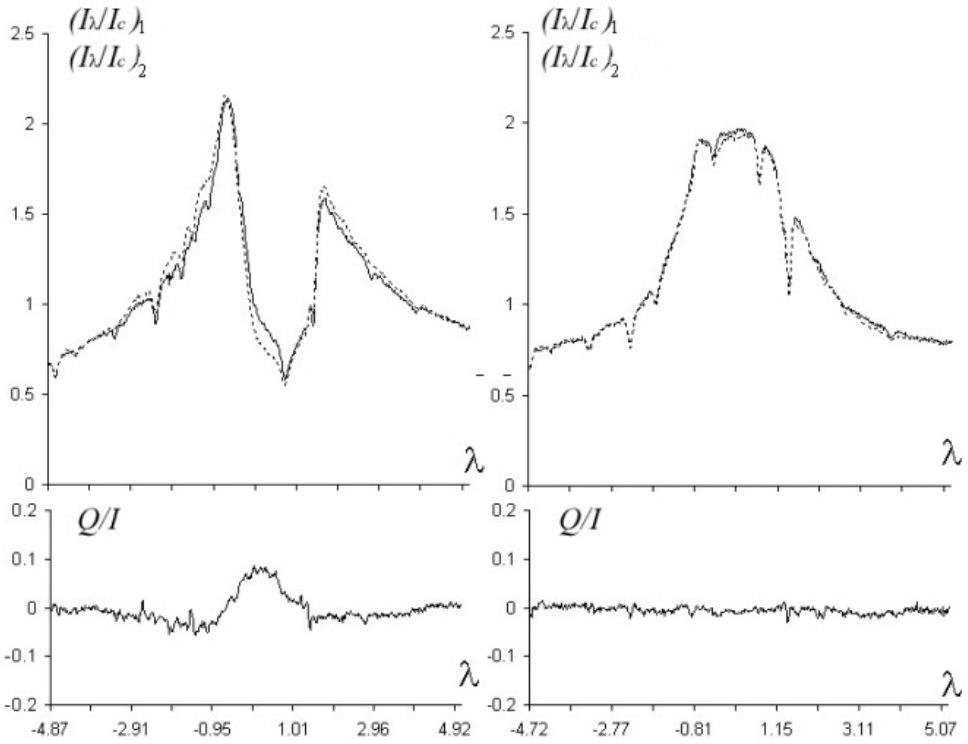


Рис. 23. Профили интенсивности линии Hα (вверху) и соответствующие им профили параметров Стокса (внизу) в двух лентах одной вспышки, полученные одновременно. По оси абсцисс отложена длина волны с 0 в центре линии

Главный результат: в двух лентах вспышки (или в двух основаниях одной петли или аркады петель) обнаружено различие как в интенсивности линии Hα, так и в наличии линейной поляризации.

Исследована причина появления высокой степени ударной линейной поляризации во вспышке балла 2B/4.8X 23 июля 2002 г., наблюдавшейся на Большом солнечном вакуумном телескопе [1]. При спектрополяриметрических наблюдениях этой вспышки была обнаружена ударная линейная поляризация только в одной, южной ленте. Максимальная поляризация превысила 10 % и наблюдалась только в течение ∼6 мин из почти двух часов наблюдений всей вспышки. В течение этого времени профили линии Hα в южной ленте имели глубокое самообращение в центре. В северной ленте поляризация и самообращение в линии Hα отсутствовали.

Сопоставление спектрополяриметрических наблюдений на БСВТ с данными Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) показало, что в отличие от северной ленты, где наблюдался типичный источник жесткого рентгена с энергией ∼20–120 кэВ, в южной ленте наблюдаемые хромосферные эффекты пространственно и по времени совпадают с источником γ-излучения (∼1 МэВ), вызванного тормозным излучением высокоэнергичных электронов. Сделан вывод, что ударная поляризация и глубокое самообращение линии Hα на небольшом участке хромосферы (<10″) в южной ленте в течение ∼6 мин могут быть связаны с высыпанием высокоэнергичных электронов в хромосферу. В то же время воздействие пучка менее энергичных электронов в северной ленте не привело к подобным эффектам. Отклик хромосферы на внедрение высокоэнергичных электронов наблюдался впервые.

Кроме того, при тщательном рассмотрении данных RHESSI было показано, что отмеченное многими авторами странное появление двух рентгеновских источников в южной ленте, на самом деле представляет собой один рентгеновский источник, разделенный потоком высокоэнергичных электронов. Исчезновение источника γ-излучения совпадает по времени с исчезновением второго рентгеновского источника в южной ленте, так же как и с исчезновением поляризации и самообращения в линии Hα.

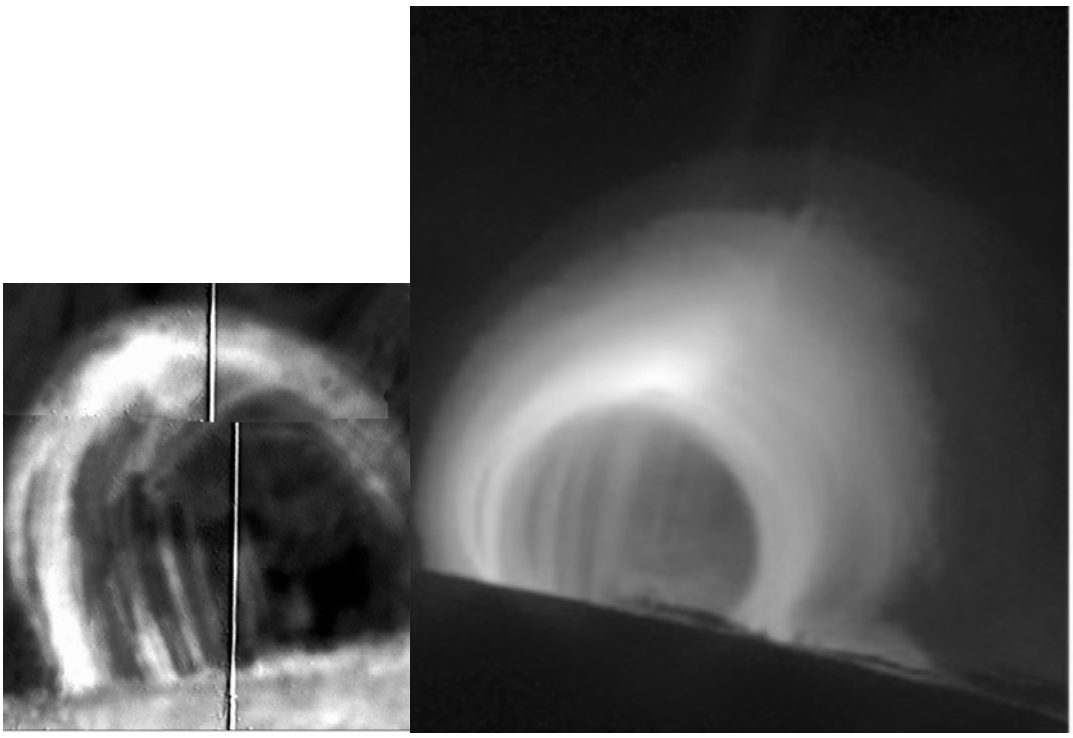


Рис. 24. Приведенные к одному размеру изображения петли в центре линии Hα (полученное на БСВТ в отраженном от зеркальной щели) и в линии 94 Å по данным SDO/AIA

2.3.1.3. Исследование структуры солнечных петель

В 2016 г. проведена обработка спектрограмм и фильтрограмм поствспышечных петель, полученных на БСВТ в 2012 г. На рис. 24 представлены приведенные к одному размеру изображения петли в центре линии Hα, (полученное на БСВТ в свете, отраженном от зеркальной щели) и в линии 94 Å по данным SDO/AIA [2].

Особое внимание при анализе материала наблюдений было уделено динамике и вопросам неоднородной структуры петель. По профилям водородной линии Hα определены физические параметры в петлях. Определение меры эмиссии в разных участках неоднородных холодных Hα-петель позволило оценить различие электронной плотности по петле. Также обнаружено различие лучевых скоростей между плотными яркими и более холодными участками петли. Сопоставление данных Hα-наблюдений с изображениями в линиях ионизованного железа в более горячих, расположенных в это время выше петлях, а также с рентгеновскими данными дает возможность понять соотношение между холодной и горячей плазмой в петлях.

2.3.1.4. Многопетельная структура микроволновых источников в мощной продолжительной вспышке

Анализ наблюдений события SOL2001-12-26, связанного с наземным возрастанием космических лучей GLE63, включая микроволновые спектры и изображения, полученные на радиогелиографе Нобеяма (NoRH) [3] на частотах 17 и 34 ГГц, Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ) на 5.7 ГГц и на телескопе TRACE [4] в канале 1600 Å, привел к следующим результатам. Вспышечная лента покрывала часть тени пятна, что типично для событий, вызывающих большие потоки частиц высоких энергий. Нетипичными были: 1) большая продолжительность вспышки — более часа; 2) умеренная интенсивность микроволнового всплеска — около 10^4 с.е.п.; 3) низкая частота максимума гиросинхротронного спектра (около 6 ГГц) и его нечувствительность к возрастанию радиопотока более чем на порядок величины. При этом оставалось примерно постоянным отно-

шение потока, излучаемого всем объемом источника в высокочастотной части спектра, к повышенному потоку в низкочастотной области, определяемому площадью источника. При самоподобии спектра наблюдалось подобие между движущимися микроволновыми источниками и наиболее яркими частями вспышечных лент, видимых в канале 1600 Å (рис. 25). Сравнение изображений, полученных на частоте 17 ГГц и в канале 1600 Å (рис. 26), подтвердило, что микроволновые источники были связаны с множеством вспышечных петель, основания которых проявлялись в ультрафиолете как перемежающиеся яркие ядра. Для понимания наблюдаемых свойств события выполнено моделирование микроволнового излучения системы однородных гиросинхротронных источников над вспышечными лентами. Разброс между спектрами и размерами индивидуальных источников определяется неоднородностью магнитного поля в областях вспышечных лент. В основном микроволновый поток определяется магнитным потоком, пронизывающим ленты и все источники. Видимая простота микроволновых структур — следствие недостаточных пространственного разрешения и динамического диапазона радиотелескопов. Полученные результаты указывают на соответствие микроволновых проявлений ускоренных электронов структурам, наблюдаемым в тепловом излучении, как и предсказывают известные модели.

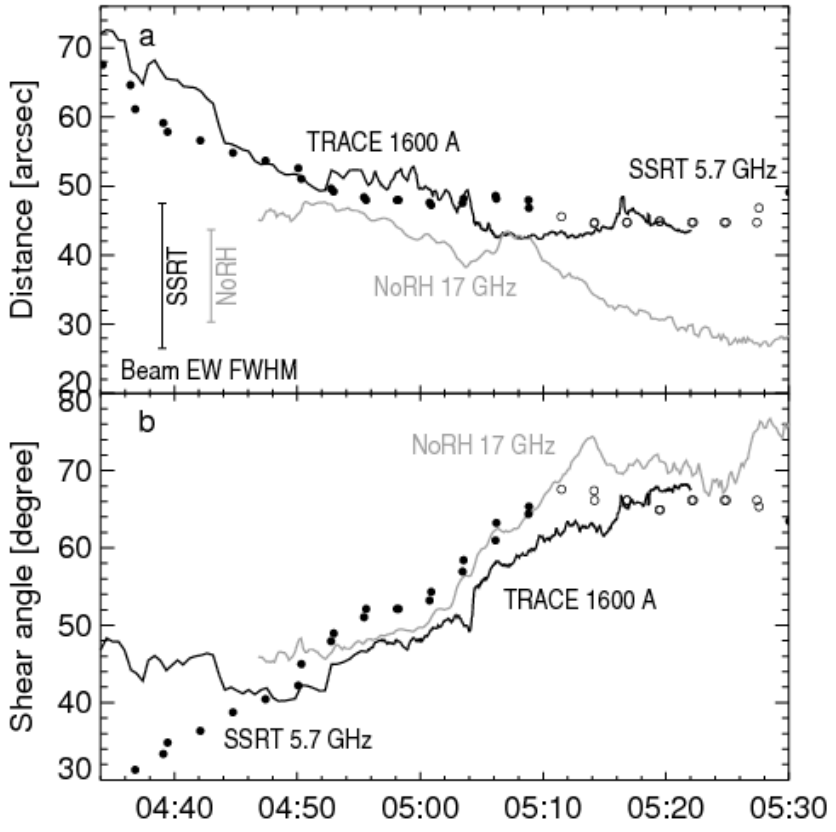


Рис. 25. Панель *a* — изменения расстояния между центрами яркости двух источников, наблюдавшихся на 17 ГГц (NoRH, серая кривая) и 5.7 ГГц (ССРТ, кружки) в сравнении со вспышечными лентами (TRACE 1600 Å, черная кривая); панель *b* — угол между линией, соединяющей источники, и нейтральной линией магнитного поля. Вертикальными отрезками на верхней панели показаны сечения диаграмм направленности NoRH и ССРТ в направлении восток–запад по половинному уровню

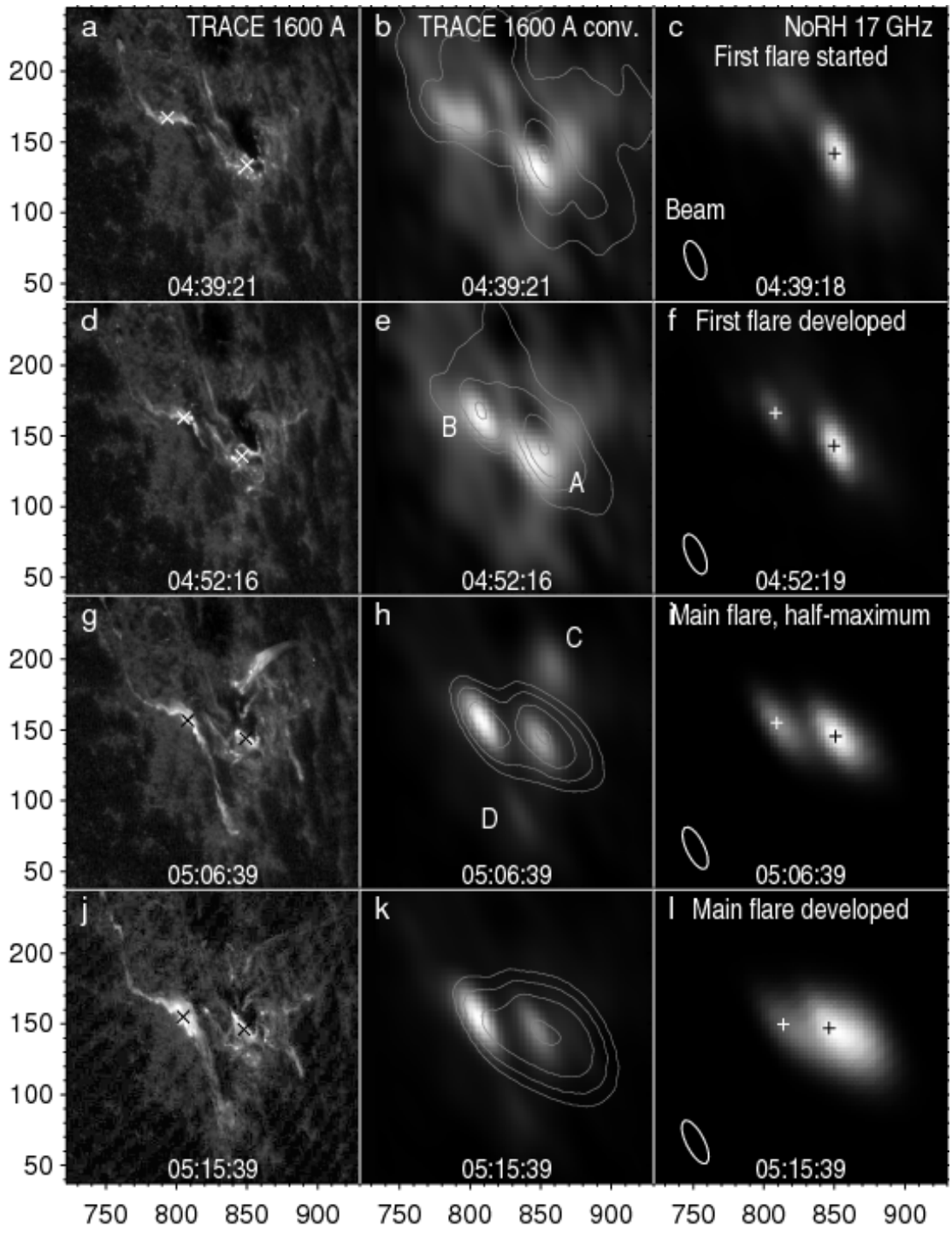


Рис. 26. Сравнение изображений в ультрафиолете (TRACE 1600 Å, слева) с изображениями NoRH на 17 ГГц (справа) на разных стадиях вспышки. Посередине — результат свертки изображений в канале 1600 Å с диаграммой направленности NoRH (эллипсы справа) с контурами микроволновых изображений. Крестами обозначены взвешенные центры яркости, поведение которых показано на рис. 25

Публикации:

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V.I., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar eruptive event responsible for GLE63. II. Multi-loop structure of microwave sources in a major long-duration flare // Solar Phys. 2016. (принято в печать).

2.3.2. Экспериментальное исследование корональных выбросов массы

2.3.2.1. Впервые выявлен сценарий формирования солнечного коронального выброса и ударной волны

Корональные выбросы массы (КВМ), ударные волны и солнечные вспышки взаимосвязаны и являются источниками возмущений космической погоды, в том числе сильных магнитных бурь и протонных возрастаний. Традиционно КВМ представляется как цельное образование, главная часть которого — это уже сформированный расширяющийся магнитный жгут, отождествляемый с корональной полостью. Полость ограничена фронтальной структурой, а считавшееся пассивным ядро — это бывшее эруптивное волокно, вмороженное в магнитный жгут. Процессы формирования КВМ были неясны. Предполагалось, что лишь после достижения КВМ сверхзвуковой скорости перед ним возникает головная ударная волна.

В результате анализа ряда солнечных эрупций выявлен самосогласованный сценарий формирования КВМ и ударной волны, прослеженный в солнечной эруптивной вспышке 13 июня 2010 г. Холодное волокно трансформируется в горячий магнитный жгут, взлетающий с ускорением, намного превышающим гравитационное. Это порождает волновое возмущение, распространяющееся со скоростью магнитного звука в активной области. Волна возникает не снаружи, а внутри зарождающегося КВМ, и приводит в движение его будущие составляющие. Проходя через петли аркады над волокном, волна вызывает их последовательный подъем. Петли сближаются, образуя фронтальную структуру КВМ а замедлившийся жгут становится его ядром. Выйдя из активной области в окружающую среду со слабым магнитным полем, волна легко превращается в ударную, похожую на взрывную. Если выброс быстрый, то такая ударная волна со временем переходит в режим головной ударной волны, иначе она затухает до слабой магнитозвуковой.

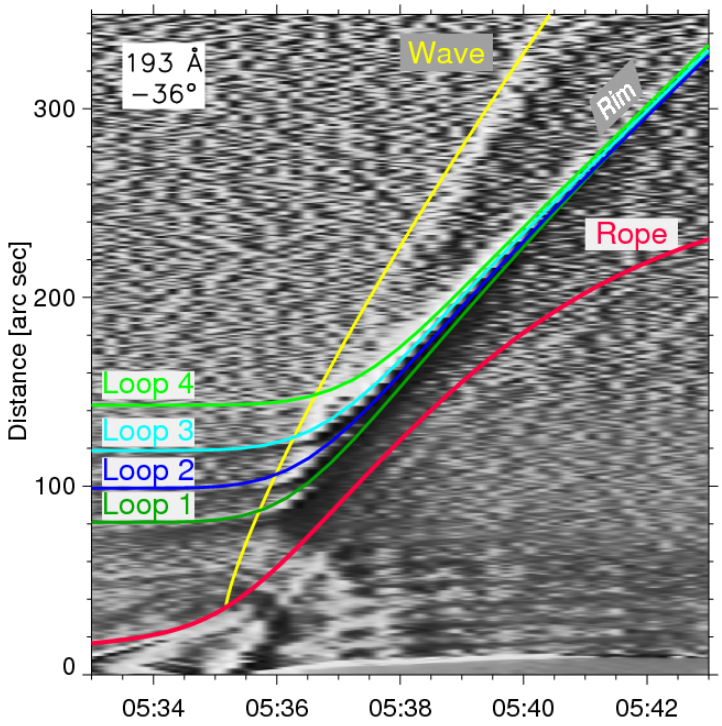


Рис. 27. Диаграмма время–высота корональных структур при формировании КВМ. Передача начального ускорения и запуск процесса формирования КВМ имеет характер волны, след которой (желтая траектория) виден внутри зарождающегося КВМ. Волна последовательно приводит в движение магнитные петли Loops 1–4. В итоге формируется видимая оболочка КВМ (Rim). Двигателем процесса является эруптивное волокно — ядро КВМ (Rope, красная траектория). Начало волны — пересечение красной и желтой траекторий

Публикации:

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kochanov A.A., Kuzmenko I.V., Prosovetsky D.V., Egorov Y.I., Fainshtein V.G., Kashapova L.K. A tiny eruptive filament as a flux-rope progenitor and driver of a large-scale CME and wave // Solar Phys. V. 291, iss. 4. P.1173–1208. DOI: 10.1007/s11207-016-0888-z.

2.3.2.2. Исследована мощная геоэффективная солнечная вспышка по наблюдениям Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ)

По данным Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ) впервые выполнено детальное исследование мощной продолжительной солнечной вспышки. Вспышка класса M7.1 произошла 26 декабря 2001 г. в активной области 9742 (N08 W54). Событие вызвало наземное возрастание интенсивности космических лучей (GLE63). Редкость таких возрастаний затрудняет понимание их причин и определяет особую важность изучения их солнечных источников. Анализ мощных вспышек по данным ССРТ был ранее ограничен, в том числе возможностями существовавших методов обработки данных. Разработанные в этом исследовании методы открывают возможности изучения мощных солнечных вспышек, зарегистрированных на ССРТ в прошлом, а также событий, наблюдаемых на новом Сибирском радиогелиографе (СРГ) в диапазоне 4–8 ГГц. Для трех часов наблюдений вспышки от предвспышечной стадии до позднего спада построено 105 пар радиоизображений Солнца на частоте 5.7 ГГц в интенсивности (рис. 28) и круговой поляризации. Совместное использование данных одномерного и двумерного режимов ССРТ позволило откалибровать все изображения и вычислить кривые изменений микроволнового потока и максимума яркостной температуры.

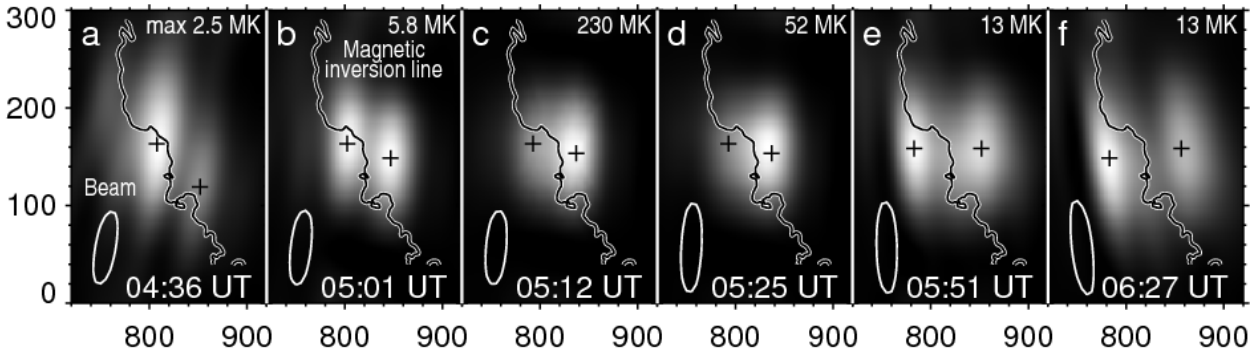


Рис. 28. Изображения вспышечной активной области 9742 на частоте 5.7 ГГц на разных стадиях события. Белые эллипсы — сечения диаграммы направленности ССРТ. Черный контур — нейтральная линия магнитного поля. Крестики — центры яркости источников. На каждом кадре указана максимальная яркостная температура

Выявлены два микроволновых источника, разделенные нейтральных линией магнитного поля. Их яркостная температура на 5.7 ГГц достигала $2.5 \cdot 10^8$ K в максимуме вспышки. На стадии роста вспышки источники сближались, двигаясь примерно вдоль нейтральной линии, а затем удалялись от нее, подобно расходящимся вспышечным лентам. Наблюдаемые движения микроволновых источников (рис. 29) объясняются их расположением в ногах вспышечной аркады. Анализ степени поляризации источников на 5.7 ГГц указывает на вовлечение во вспышечные процессы сильных магнитных полей активной области 9742, вероятно, над тенью пятна, что соответствует установленному ранее признаку протонно-продуктивных событий и предполагает существенный вклад вспышечных процессов в ускорение солнечных частиц до высоких энергий.

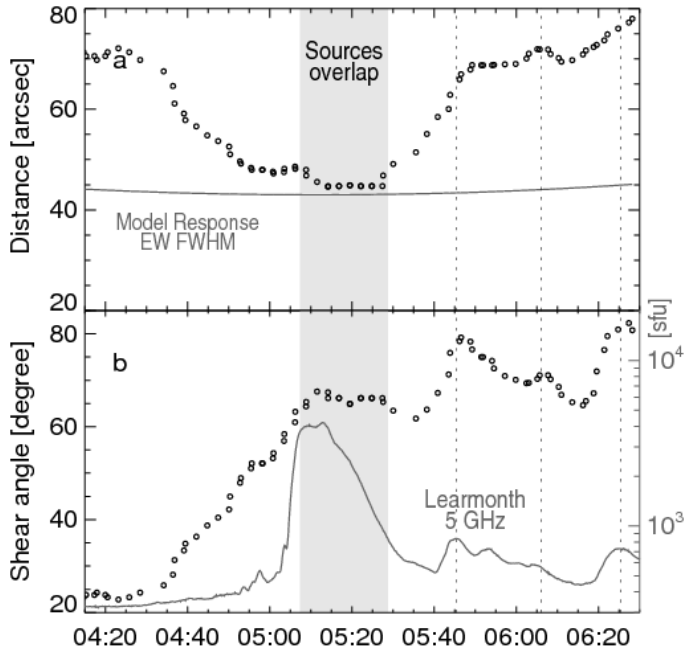


Рис. 29. Динамика микроволновых источников на частоте 5.7 ГГц: *a* — расстояние между центрами яркости источников. Серой линией показано сечение на половинном уровне модельного изображения — предел разрешения двух источников в направлении восток–запад. Вертикальной серой полосой обозначен интервал, в котором изображения источников перекрывались, что снижает точность измерений. *b* — угол между линией, соединяющей источники, и нейтральной линией магнитного поля. Внизу для сравнения приведен временной профиль (серая кривая) интегрального потока микроволнового всплеска в логарифмическом масштабе, записанный в обсерватории Лермонт на частоте 5 ГГц

Публикации:

Grechnev V.V., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar event responsible for GLE63. I. Observations of a major long-duration flare with the Siberian Solar Radio Telescope // Solar Phys. 2016. DOI: 10.1007/s11207-016-0994-y. arXiv:1609.02256v1 [astro-ph.SR].

2.3.2.3. Анализ предэруптивной стадии и экспериментальное обоснование образования ударного разрыва внутри ускоряющегося коронального выброса

Исследованы физические отличия в формировании «постепенных» и «импульсных» CME (coronal mass ejection — корональный выброс массы, КВМ) на предельно низких высотах $h_0<0.2R_0$ непосредственно перед и в течение начальной фазы их движения по данным инструмента AIA/SDO ультрафиолетовом излучении (h_0 — высота относительно поверхности Солнца). Показано, что основой структуры «постепенного» CME является магнитный жгут, расположенный в короне. Начальная фаза «постепенного» CME начинается с движения внешней оболочки магнитного жгута, которая становится затем основой фронтальной структуры CME. Начальная фаза «импульсного» CME начинается с появлением вблизи фотосферы движущейся от Солнца полости, динамика которой, предположительно, отражает всплытие из-под фотосферы магнитной трубки с холодной плазмой.

Разработан метод отождествления взрывной и поршневой ударных волн, связанных с CME, с использованием измерений радиовсплесков II типа, а также создан комплекс программ для реализации этого метода.

По данным инструмента AIA космической обсерватории SDO (изображения в каналы 193 и 211 Å) и изображениям белой короны, полученным на коронографах LASCO C2 и C3 космической обсерватории SOHO, проведен анализ CME, произошедшего 3 ноября 2010 г. В данном событии впервые удалось одновременно зарегистрировать и измерить фронты поршневой и взрывной ударных волн, вызванных формированием и распростра-

нением СМЕ. Показано, что каждому из этих типов ударных волн может соответствовать распространяющийся впереди фронта источник радиовсплеска II типа.

По результатам анализа данных инструмента AIA/SDO и EUVI/STREREO было подтверждено, что начальная фаза «постепенного» СМЕ (английская аббревиатура СМЕ) начинается как движение из состояния покоя внешней оболочки коронального магнитного жгута, которая становится затем основой фронтальной структуры СМЕ. На примере анализа события 5 января 2013 г. показано, что другой тип СМЕ — «импульсный» — может возникать как результат выброса с поверхности Солнца области пониженной яркости (полости) (канал 193 Å), которая затем становится основой будущего СМЕ. Анализ трехмерной структуры полости, вид которой представлен на рис. 30, ее динамики и кинематики, а также сопоставление результатов анализа с предсказаниями теории, позволяют отождествить полость с магнитной трубкой (жгутом), заполненной холодной плазмой, выброшенной с большой скоростью из конвективной зоны в атмосферу Солнца. Теоретические оценки показывают, что причиной выброса магнитной трубкой из конвективной зоны может быть развитие неустойчивости Паркера («медленной» волны).

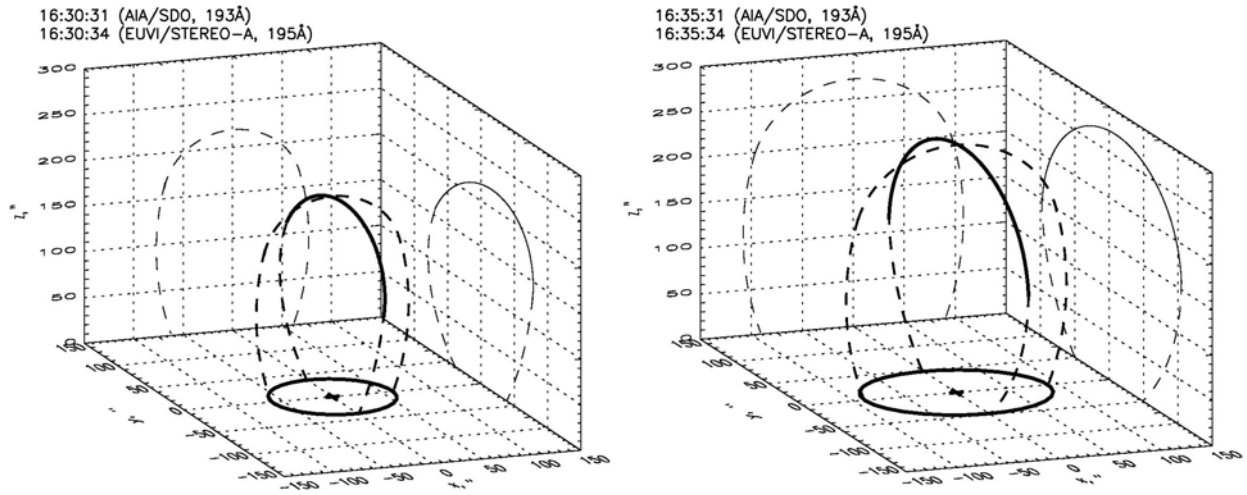


Рис. 30. Трехмерная картина границы полости с началом координат на поверхности Солнца на лимбе для двух последовательных моментов времени: слева — ≈16:30:31, справа — ≈16:35:31. «Импульсный» СМЕ 5 января 2013 г.

Проведен анализ «импульсного» СМЕ 24 августа 2014 г. по УФ-изображениям в каналах 193, 304, 1600 и 1700 Å инструмента SDO/AIA и по данным наблюдений в линии Hα (6562.8 A˚) телескопов обсерваторий EI Teide и Big Bear. Показано, что формирование «импульсного» СМЕ связано с появлением магнитной трубки (жгута), движущейся со скоростью ≈35 км/с и содержащей плазму более холодную, чем плазма фотосферы. При движении в короне магнитная трубка сталкивается с корональным квазистационарным магнитным жгутом, два основания которого укоренены на фотосфере, и ускоряет его (приводит в движение). В результате такого взаимодействия происходит формирование СМЕ, фронтальной структурой которого является поверхность корональной магнитного жгута. На стадии формирования в окрестности оснований СМЕ, по данным SDO/HMI, не было зарегистрировано возрастания или изменения потока магнитного поля. Это может свидетельствовать в пользу того, что магнитная трубка начала свое движение из слоев, располагающихся в окрестности температурного минимума.

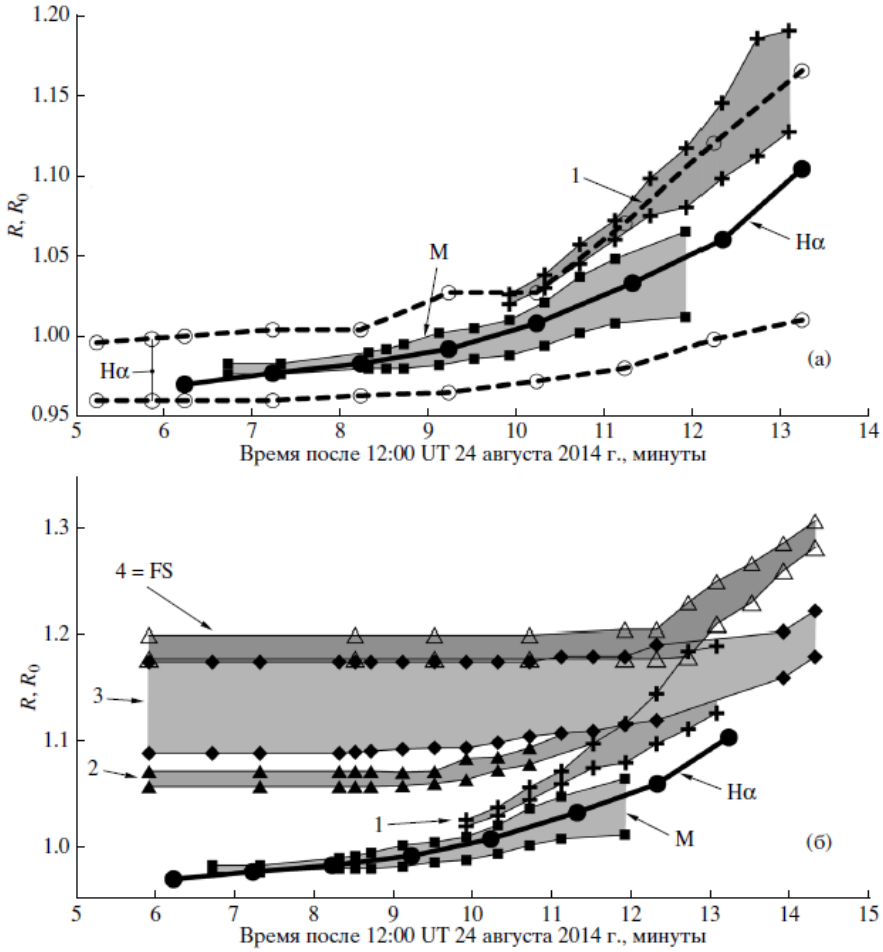


Рис. 31. Зависимости от времени расстояния *R* от центра Солнца магнитной трубки М и четырех корональных арочных структур 1, 2, 3, 4: *а* — границы RF- и RE-профилей разностной яркости трубки М в линии Hα (светлые кружки с жирными штриховыми линиями) и положения максимумов ΔPMAX на профилях бегущей разностной яркости в линии Hα трубки М (черные кружки со сплошной жирной линией), границы RF- и RE-профилей разностной яркости в канале 193 Å трубки М (черные квадратики), структуры 1 (крестики); *б* — аналогичные построения по профилям канала 193 Å для структуры 2 (черные треугольники), структуры 3 (черные ромбики) и структуры 4=FS (светлые треугольники)

Публикации:

Eselevich V.G., Eselevich M.V., Zimovets I.V. Possible reasons for the frequency splitting of the harmonics of type II solar radio bursts // Astronomy Rep. 2016. V. 60, N 1. P. 163–173.

2.3.2.4. Изучение деталей генерации КВМ различных типов и связанных в ними ударных волн, свойств активных областей, в которых возникают КВМ

Исследованы формирование и движение на начальном этапе корональных выбросов массы и связанных с ними ударных волн с использованием многоволновых данных телескопов SDO/AIA и других инструментов.

С использованием многоволновых данных SDO и других космических аппаратов исследовано формирование и начальная стадия движения нескольких корональных выбросов массы (КВМ), связанных с эрупцией протуберанцев и с рентгеновскими вспышками. Сделан вывод, что во всех рассмотренных случаях эрупция протуберанца явилась триггером возникновения КВМ. Обнаружено, что формирование и движение каждого из этих КВМ характеризуются индивидуальными особенностями. Эти особенности изучены.

Например, для некоторых КВМ движение протуберанца приводило к появлению последовательности движущихся с разной скоростью корональных возмущений, которые, догоняя друг друга в определенном месте, формировали в этом месте фронтальную структуру КВМ. Обнаружена положительная корреляция между высотой эруптивного протуберанца, связанного с КВМ, и высотой фронтальной структуры КВМ, измеренными перед началами их движений. Для двух КВМ по данным SDO показано, что кинематика тела КВМ и связанной с ними ударной волны существенно различаются. Установлено, что зависимость положения и скорости ударной волны от времени, полученные по данным SDO, согласуются с теоретическими зависимостями изменения со временем этих параметров движения в рамках автомодельного движения взрывной ударной волны. Сделан вывод, что обнаруженные ударные волны не являются поршневыми с телом КВМ в качестве поршня.

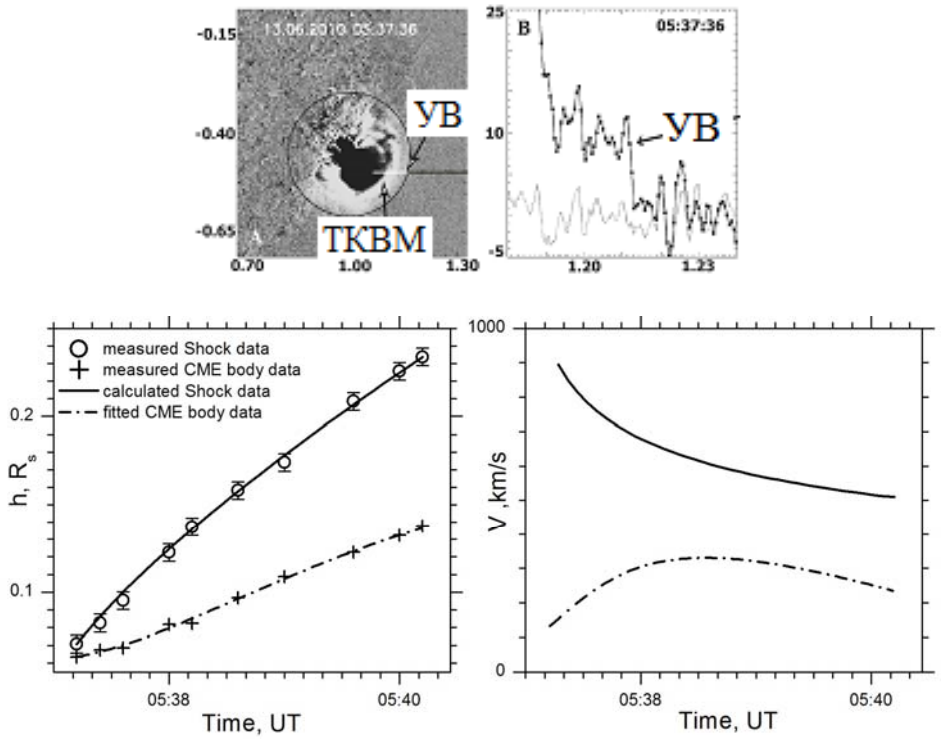


Рис. 32. Вверху: левая панель — сформировавшийся КВМ, зарегистрированный 13.06.2010. Показано тело КВМ (ТКВМ) и связанная с КВМ ударная волна (УВ). Правая панель — скачок яркости, который мы рассматриваем как бесстолкновительную УВ. Внизу: слева — зависимость от времени ТКВМ и УВ; справа — зависимости от времени скорости ТКВМ и УВ. Видно, что характер изменения со временем скорости ТКВМ и УВ существенно различается

По данным GOES-12/SXI, SOHO/EIT и SDO/AIA исследовано формирование и начальная стадия движения нескольких быстрых импульсных КВМ типа гало (ГКВМ), связанных со вспышками рентгеновских классов M и X, но не связанных с эрупцией солнечных волокон. По особенностям формирования рассмотренные ГКВМ можно разделить на три группы:

1. ГКВМ возникают вследствие нарушения равновесия одиночных эмиссионных петлеобразных структур, наблюдаемых в канале 195 Å инструмента EIT за несколько часов до первой регистрации выброса массы в поле зрения рентгеновского телескопа SXI. После эрупции эти петли становятся структурными элементами ГКВМ.

2. ГКВМ может формироваться в результате нарушения равновесия нескольких петель в процессе объединения этих петель в одну структуру.

3. Формирование ГКВМ начинается с движения вверх группы корональных петель, наблюдаемых по данным AIA сначала в «горячем» канале 131 Å, спустя несколько минут — в более «холодном» канале 211 Å, затем в канале 193 Å, и, наконец, в канале 171 Å. Воздействие движущихся петлеобразных структур на вышележащие области короны приво-

дит к формированию и движению фронтальной структуры ГКВМ повышенной яркости. При этом сами эруптивные петли не становятся структурными элементами ГКВМ.

Все исследованные ГКВМ начали свое поступательное движение до возникновения связанных с ними вспышек. По результатам изучения кинематики рассмотренных ГКВМ сделан вывод о существовании двух типов КВМ, различающихся временным профилем скорости, который определяется площадью и магнитной конфигурацией активной области, в которой был сформирован выброс массы. Показано, что ГКВМ, возникшие в разное время в одной и той же активной области, имеют один и тот же тип профиля скорости (гомологичные КВМ).

На рис. 33 показаны изображения КВМ 17.01.2005 по наблюдениям инструментом GOES-12/SXI и коронографом LASCO C2 и кинематические характеристики этого КВМ в сравнении с интенсивностью мягкого и жесткого рентгеновского излучения.

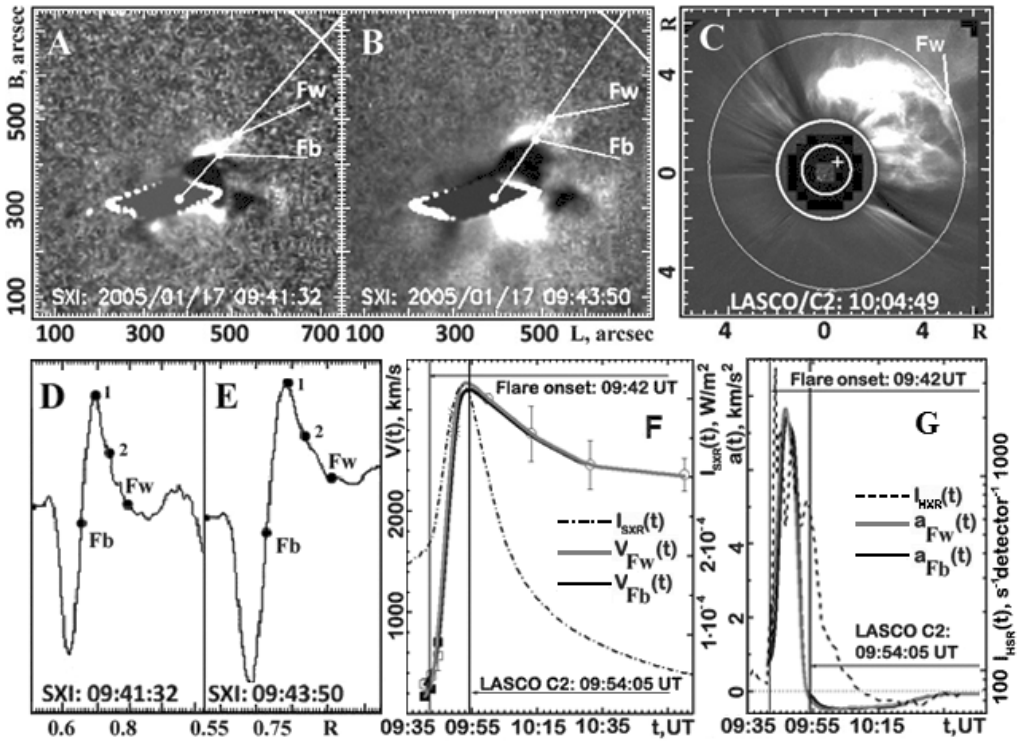


Рис. 33. A, B — изображения фрагментов солнечного диска по данным SXI для события 17 января 2005 г. Белые точки отмечают положение центра связанной с выбросом массы вспышки — предполагаемое места источника КВМ. Fw_1 обозначает фронт белой петлеобразной структуры исследуемого КВМ, Fb_1 — фронт черной структуры, сопровождающей белую петлю. Прямые линии из места возникновения выброса — линии, вдоль которых производилось сканирование яркости. Lx, Ly — расстояния от центра солнечного диска в угловых секундах. C — КВМ в поле зрения LASCO C2. Здесь расстояния выражены в радиусах Солнца R_o. Белые толстые окружности выделяют границы диска Солнца и искусственной луны коронографа C2. Крестиком отмечено место источника выброса массы на диске Солнца. D, E — распределения яркости вдоль прямых линий на панелях A, B. Цифрами 1 и 2 отмечены вершина и середина фронта белой петли. Fw — основание белой петли, а Fb — вершины фронта черной структуры, сопровождающей белую петлю. По оси абсцисс отмечены расстояния от центра солнечного диска, выраженные в R_o. Значения яркости на этих рисунках не приводятся. F — скорость ГКВМ в сравнении с $I_{SXR}(t)$. Белыми квадратами показаны скорости оснований белых петлеобразных структур, черными квадратами отмечены скорости черных структур, белыми кругами показаны скорости ГКВМ по данным LASCO, звездочками отмечены промежуточные скорости, полученные по данным SXI и LASCO C2 для белых и черных петлеобразных структур; штрихпунктирной линией показан профиль $I_{SXR}(t)$. Сплошными линиями показаны профили скорости $V(t)$ фронта «белой» петли (тонкая линия) и следующей за ней черной структуры (толстая линия), проведенные через соответствующие точки с использованием B-сплайнов. G — $a(t)=dV(t)/dt$ (тонкая и толстая сплошные линии) в сравнении с $I_{HXR}(t)$ в диапазоне 50–100 кэВ (пунктирная линия)

Выполнен сравнительный анализ кинематики КВМ и связанных с ними ударных волн по данным LASCO. Для двух групп быстрых КВМ, связанных с ударной волной (УВ), в поле зрения коронографов LASCO определены зависимости от времени положений границы тела КВМ и УВ, а также скорости этих структур. Отдельно анализировались лимбовые КВМ, источники которых располагались в пределах 30^{o} относительно лимба, и КВМ типа гало (ГКВМ) с источниками в пределах 30^{o} относительно центра солнечного диска. В первом случае кинематика КВМ и УВ отражает результат совместного влияния поступательного движения КВМ и его расширения во всех направлениях. Во втором случае особенности движения КВМ и УВ определяются преимущественно расширением этих структур. Эти результаты были сопоставлены с временными зависимостями кинематических параметров КВМ и УВ в трехмерном пространстве, определенных с использованием «Модели мороженого» (Ice Cream Cone Model) выброса массы. Показано, что в среднем во всех случаях практически до границы поля зрения коронографа LASCO C3 скорость ударной волны больше скорости тела КВМ. Характер изменения скорости тела КВМ и УВ различается как для отдельных КВМ, так для разных групп КВМ. Оказалось, что по наблюдениям в поле зрения LASCO C2 и C3 [6] для лимбовых и ГКВМ, в среднем скорость как тела КВМ, так и УВ уменьшается со временем (расстоянием) и для обеих групп выбросов массы скорость УВ уменьшается быстрее со временем, чем скорость тела КВМ. В результате разность скоростей тела КВМ и УВ для обеих групп КВМ в среднем уменьшается со временем (расстоянием), а расстояние между этими структурами увеличивается. По данным расчетов, в трехмерном пространстве скорость УВ и тела КВМ также меняется с разным темпом в зависимости от времени (расстояния). Для пяти ГКВМ показано, что существует хорошее согласие между распределением $\Delta R/R_b(R)$, полученным в поле зрения LASCO C3 из расчетов характеристик КВМ и связанной с ним ударной волны в трехмерном пространстве, и распределением, полученным Russell and Mulligan в 2002. Здесь ΔR — расстояние между телом КВМ и УВ на оси КВМ, R_b — радиус тела КВМ на его оси, R — расстояние от центра Солнца.

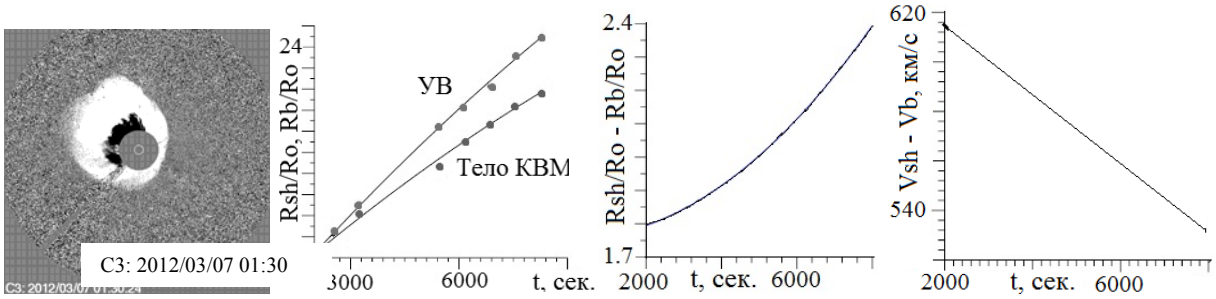


Рис. 34. Событие 07.03.2012. КВМ с источником вблизи центра солнечного диска: 1-я слева панель — изображение КВМ в поле зрения LASCO C3; 2-я слева панель — зависимость положения границы тела КВМ и связанной ударной волны (УВ) от времени; 3-я панель слева — разность положений УВ и тела КВМ от времени; 4-я слева панель — разность скоростей тела УВ и тела КВМ от времени. Время отсчитывается от начала 07.03.2012

Радиальные распределения величины магнитного поля в солнечной короне получены с использованием сведений о быстрых КВМ типа гало. Опираясь на метод нахождения радиальных профилей величины магнитного поля в солнечной короне $B(R)$, предложенный Gopalswamy and Yashiro в 2011 г., который применялся для направлений вблизи плоскости неба, определены радиальные распределения величины магнитного поля вдоль направлений, близких к оси Солнце–Земля. Для этого с использованием Ice Cream Cone Model КВМ по данным SOHO/LASCO найдены трехмерные характеристики быстрых КВМ типа гало и связанных с ними ударных волн. С помощью этих данных удалось получить распределения $B(R)$ до расстояния от центра Солнца ≈43 радиусов Солнца, что примерно в два раза дальше, чем в работе Gopalswamy and Yashiro. Сделан вывод о том, что в

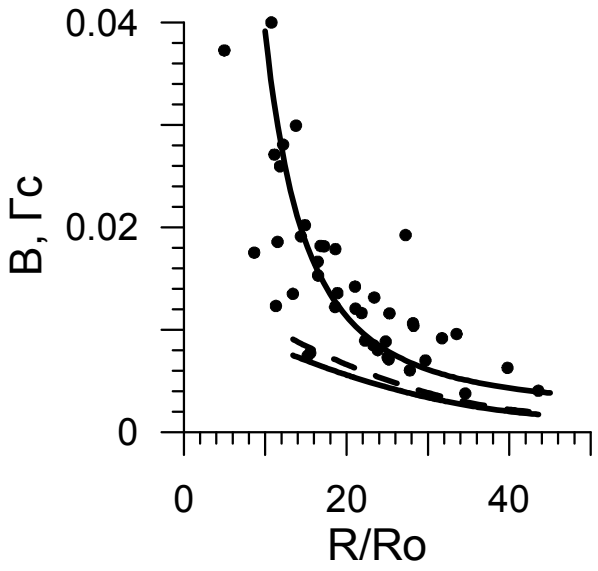


Рис. 35. Кружки — значения $B(R)$, полученные с помощью 3D-расчетов параметров КВМ в разные моменты времени для каждого рассмотренного события. Жирная линия, пересекающая кружки — $B_r(R)=8\ 10^{-5}(215.5/(R/R_o))^2+0.002$ Гс — среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в горизонтальном участке медленного солнечного ветра в зависимости от расстояния. Две линии ниже — расчеты поля в предположении, что приосевая область КВМ движется в быстром солнечном ветре (СВ), скорость которого V_{sw}=600 км/с (штриховая кривая) и 800 км/с (сплошная кривая) независимо от расстояния и с зависимостью концентрации протонов N_p от расстояния, характерной для быстрого СВ

некоторых случаях метод нахождения поля Gopalswamy and Yashiro приводит к ошибочным результатам и должен быть модифицирован.

Предложены пути модификации.Исследованы магнитные свойства магнитносвязанных ведущих и замыкающих солнечных пятен, и эти свойства сопоставлены с контрастом C_{304} излучения в линии HeII 304 над тенью исследуемых пятен.

С использованием векторных измерений магнитного поля инструментом SDO/HMI и данных телескопов SDO/AIA для 24-го цикла солнечной активности впервые были проанализированы магнитные свойства тени отдельно ведущих и замыкающих магнитносвязанных пятен, и эти свойства были сопоставлены с контрастом C_{304} излучения в линии HeII 304 над тенью исследуемых пятен. Показано, что для 70–78 % (для выборок разных объемов) рассмотренных пар пятен минимальный в пределах тени угол наклона силовых линий поля к положительной нормали к поверхности Солнца α_{min} меньше в ведущих пятнах по сравнению с замыкающими пятнами, а в 75–83 % средний в пределах тени угол $<\alpha>$ меньше в ведущих пятнах по сравнению с замыкающими. Показано, что между α_{min} в ведущих и замыкающих пятнах, а также между $<\alpha>$ в двух типах пятен существуют положительные корреляции. Сделан вывод, что в среднем с ростом максимума магнитной индукции B_{max}, ее среднего значения $<B>$ в тени пятна, а также площади тени S углы α_{min} и $<\alpha>$ уменьшаются в обоих типах пятен. Подтверждено существование положительной корреляции между B_{max} и S в ведущих и замыкающих пятнах. Выявлена положительная корреляция между $<B>$ и S в обоих типах пятен. Полученные зависимости между B_{max} и S позволили сделать вывод о том, что солнечные пятна являются «неглубокими» образованиями, при этом замыкающие пятна являются менее глубокими, чем ведущие. Удалось продемонстрировать, что для пятен, удовлетворяющим определенным условиям, существует положительная корреляция между $C_{304\text{-}L}$ и $<\alpha_L>$ для ведущих пятен, и между C_{304-L}/C_{304-F} и l_L/l_F, где $l_L(l_F)$ — длина части силовых линий, соединяющих ведущее и замыкающее пятна, от тени ведущего (замыкающего) пятна до вершины силовой линии. Связь B_{max} и S и между $<B>$ и S показана на рис. 36.

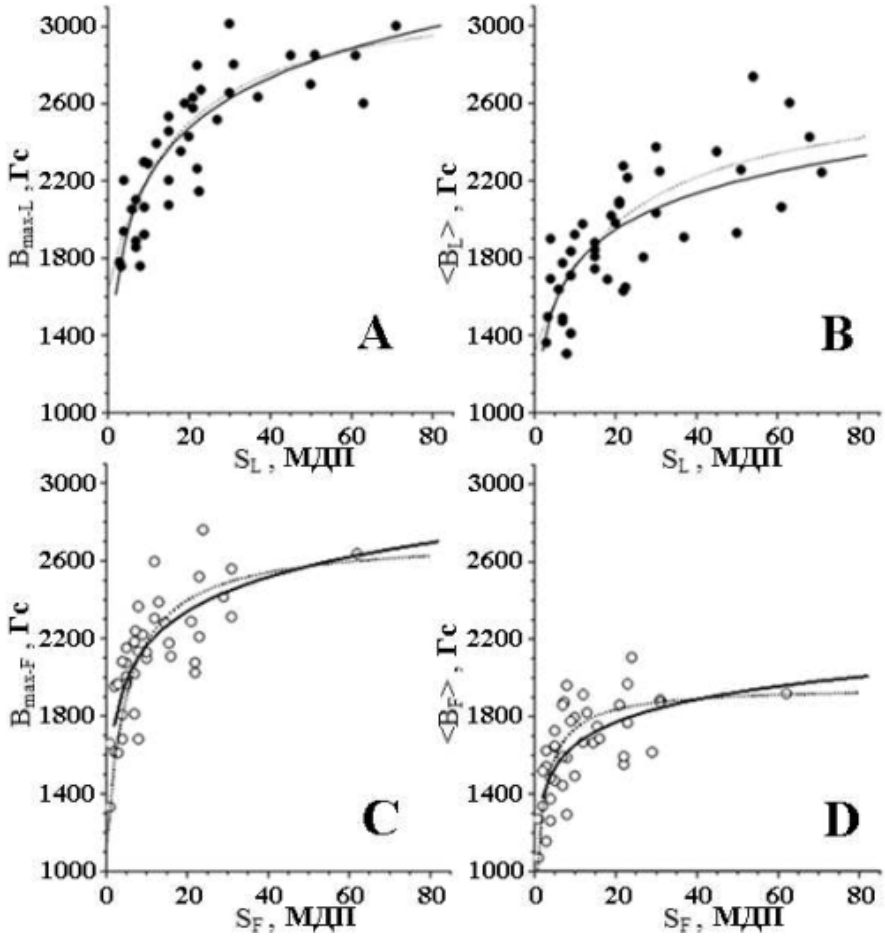


Рис. 36. Связь максимума магнитной индукции (A, C) и среднего значения магнитной индукции (B, D) с площадью тени пятна для ведущих (A, B) и замыкающих (C, D) пятен. Сплошные жирные линии — логарифмические линии регрессии $y=A+B\ln(x)$, тонкие линии — линии регрессии, описываемые уравнениями типа $y=A+S/(S+B)$, являющиеся модификацией линии регрессии, полученной Houtgast and van Sluiters в 1948 г., но с наложенным условием, что поле в пятне не стремится к нулю, когда площадь тени стремится к нулю. Для логарифмической зависимости: A — r=0.88; B — r=0.75; C — r=0.79; D — r=0.68. Для линии регрессии, описываемой уравнением $y=A+S/(S+B)$, значения r отличаются в пределах 0.01

Исследованы особенности изменения углов наклона силовых линий магнитного поля α к радиальному направлению из центра Солнца в различных участках области вспышки после ее начала в эруптивном событии 07.06.2011, включающим эрупцию волокна, вспышку и КВМ. Обнаружено, что после начала вспышки в окрестности линии раздела полярности фотосферного поля угол наклона линий поля резко возрастает. При этом скачок α уменьшается по мере удаления от линии раздела полярности (ЛРП) поля и практически исчезает в области повышенных значений поля с обеих сторон от ЛРП (рис. 37).

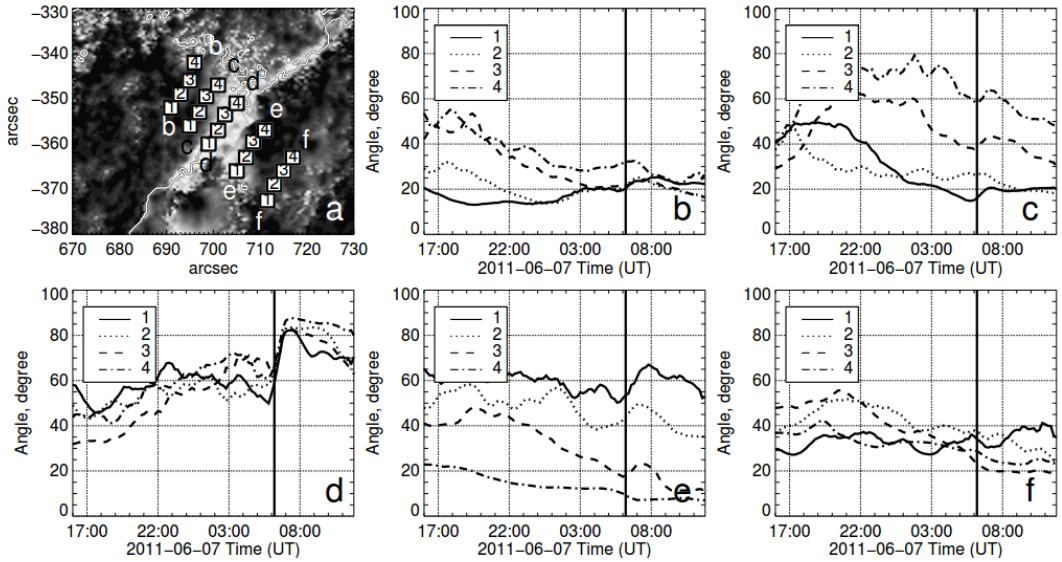


Рис. 37. Панель *a* — положения участков в АО NOAA 11226 (квадраты, отмечены номерами) в области повышенных во время вспышки значений угла α и в ближайшей окрестности этой области, нанесенные на пространственное распределение угла α в момент времени *t*=06:24:00 UT (07.06.11), т. е. после начала вспышки. На панелях *b*, *c*, *d*, *e*, *f* показано изменение со временем угла α, усредненного в пределах квадрата, в разных квадратах. Буквенные обозначения панелей, начиная *c* и *b*, совпадают с буквенными обозначениями рядов квадратов на панели *a*

Обнаружено, что в каждый момент времени вспышечные ленты, возникающие во время эруптивного события 07.06.2011, оказываются над участками фотосферы в окрестности локальных максимума магнитной индукции и минимума угла α (рис. 38)

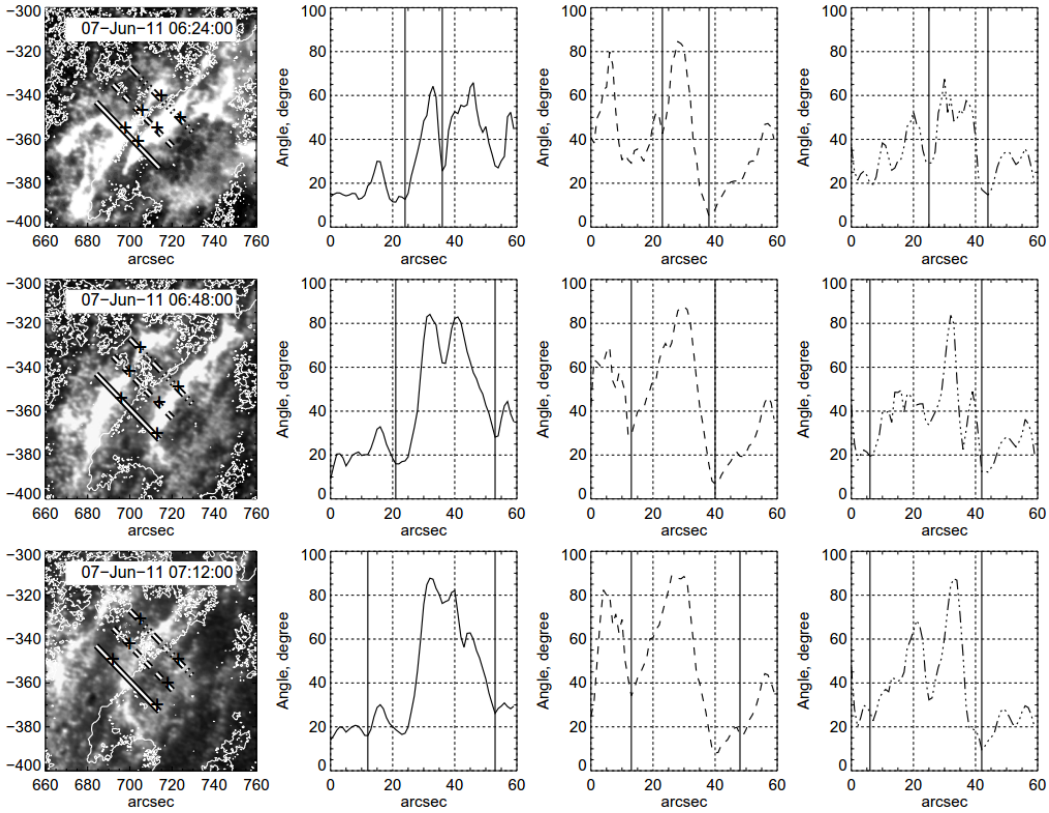


Рис. 38. Левые панели — изображения фрагментов Солнца в линии 1700 Å в разные моменты времени. На этих панелях выделяются вспышечные ленты (полосы белого цвета) и нанесены линии, вдоль которых сканировались углы наклона линий поля α. Справа от изображений Солнца показаны распределения углов α вдоль указанных линий. Расстояние вдоль линий отсчитывается от их верхних концов. Тип линий (сплошная, штриховая и т. д.), вдоль которых сканировались углы α, и линий на графиках совпадает

Впервые удалось обнаружить вариации характеристик магнитного поля в тени солнечных пятен в области эруптивного события, включающего в себя вспышку и образование КВМ.

Обнаружены вариации характеристик магнитного поля в тени солнечных пятен в активных областях (АО), в которых возникают эруптивные события (солнечные вспышки, КВМ). Анализировалось поведение максимума модуля магнитной индукции B_{max}, минимального угла наклона силовых линий поля к радиальному направлению из центра Солнца α_{min}, а также средних в пределах тени значений $B(B_{mean})$ и $\alpha(\alpha_{mean})$. Показано, что в некоторых пятнах АО после начала вспышки происходит изменение характера поведения указанных параметров магнитного поля по сравнению с наблюдавшимся до начала вспышки. Так, например, по наблюдениям изменений углов в нескольких АО было обнаружено, что в течение ≈3 ч до солнечной вспышки/эрупции в тени пятен, близко расположенных к «ногам» эруптивного жгута, сформировавшего впоследствии КВМ, наблюдается увеличение угла α_{min} до больших значений (от 4 до 10°) с последующим сильным его уменьшением в течение 1–3 ч после начала вспышки до малых значений (≤1°). При этом угол α_{mean} изменяется значительно меньше. Это означает, что магнитная трубка из тени таких пятен после начала вспышки отклоняется от первоначального положения почти как целое, т. е. без существенной трансформации распределения силовых линий магнитного поля внутри трубки (рис. 39).

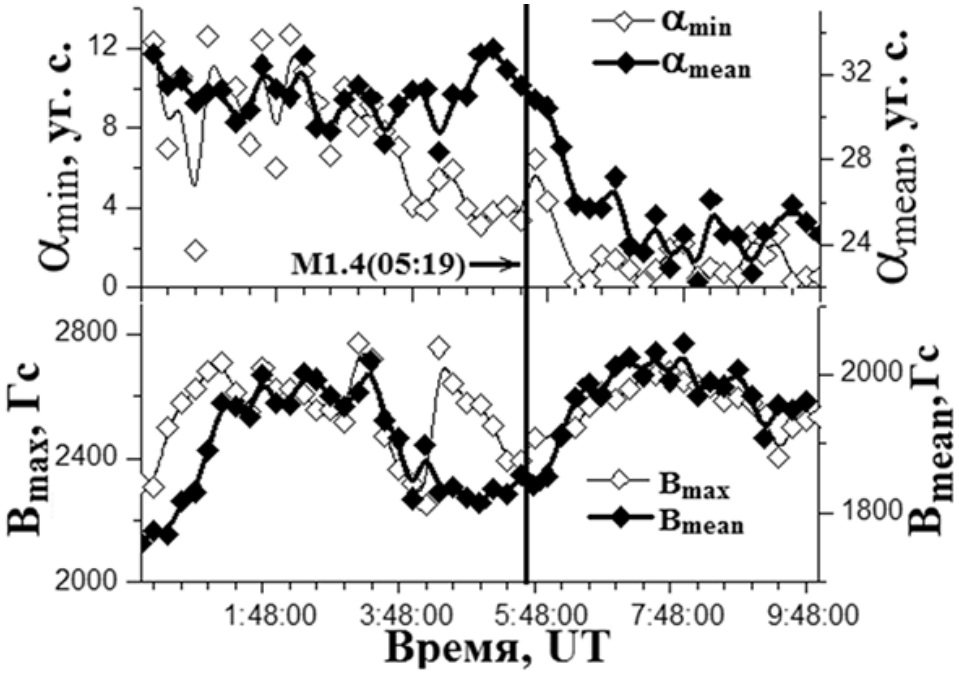


Рис. 39. Изменение со временем α_{min} и α_{mean} (вверху) и B_{max} и B_{mean} (внизу) в тени одного из пятен в эруптивном событии 02.08.2011. Вертикальной толстой линией указан момент начала вспышки M1.4 (05:19)

Публикации:

1. Fainshtein V.G., Egorov Ya.I., Rudenko G.V., Anfinogentov S.A. Magnetic field variations accompanying the filament eruption and the flare related to coronal mass ejections // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 8. P. 1060–1067.

2. Fainshtein V.G., Egorov Ya.I., Rudenko G.V., Anfinogentov S.A. On the variations in the photospheric magnetic field in the vicinity of a solar flare as deduced from SDO/HMI measurements of the magnetic field vector // 2016. eprint arXiv:1601.02310.

3. Еселевич В.Г. Природа возникновения корональных выбросов массы: современное сотояние исследований и последние результаты // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2016. Т. 112, № 1. С. 47–58.

2.3.3. Исследование спокойных солнечных процессов, оказывающих воздействие на магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли, оказывающие влияние на состояние космической погоды

2.3.3.1. Идентификация источников солнечного ветра

В короне Солнца были выявлены области, потенциально являющиеся источниками потоков солнечного ветра. Анализировались данные внеатмосферных обсерваторий COR2/STEREO в белом свете и AIA/SDO в трех различных длинах волн: 171, 193 и 211 Å. Определялись гелиографические координаты отдельных потоков солнечного ветра, и проводилось сопоставление с наблюдаемыми корональными структурами на диске. Найдено, что возможными источниками солнечного ветра являются области на границах корональных дыр, области вблизи активных областей и яркие точки. Анализировалась также дифференциальная мера эмиссии для областей внутри корональных дыр, и были обнаружены области с более низкой концентрацией по отношению к окружающей плазме. Подобные области свидетельствуют о более интенсивном потоке вещества, движущемся от Солнца и образующем солнечный ветер, и, вероятно, могут являться областями генерации солнечного ветра (рис. 40).

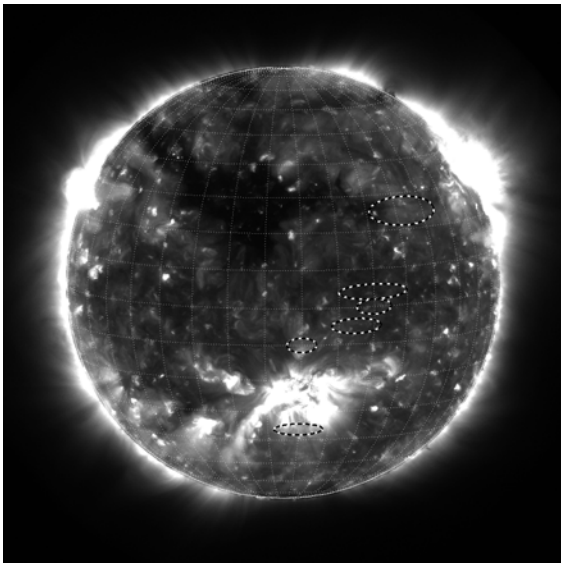


Рис. 40. Изображение, полученное AIA/SDO на длине волны 193 Å. Пунктирными эллипсами показаны возможные области генерации потоков солнечного ветра

2.3.4. Моделирование солнечных процессов и явлений

2.3.4.1. Взаимодействие колебаний с нулевой точкой магнитного поля

Показано, что взаимодействие трехминутных медленных магнитозвуковых волн с корональной нулевой точкой, в которой происходит вспышечное энерговыделение, возможно из-за трансформации медленной моды в быструю в слое, где альфвеновская скорость близка к звуковой. Рассчитанный механизм проникновения магнитозвуковых волн в область вспышечного энерговыделения вследствие трансформации мод может объяснить наблюдаемую связь между трехминутными волнами в пятнах и квазипериодическими колебаниями вспышечного излучения.

Публикации:

Afanasyev A.N., Uralov A.M. Slow-mode MHD wave penetration into a coronal null point due to the mode transmission // Solar Phys. Online First (SoPh Homepage). Publication Date: 05/2016. DOI:10.1007/s11207-016-0899-9.

2.3.4.2. Численное моделирование крупномасштабных корональных волн

Показано, что в результате взаимодействия корональной ударной волны с областями повышенной и пониженной альфвеновской скорости волновой фронт существенно искажается и возникают вторичные волновые фронты сжатия и разрежения. Амплитуда и тип отраженной назад волны определяются скачком плотности плазмы. Полученные результаты могут быть использованы для объяснения сложной картины распространения крупномасштабной корональной волны, наблюдаемой в крайнем ультрафиолете (EIT-волны), в конкретном солнечном событии.

2.3.5. Прогнозирование геоэффективных процессов в солнечной атмосфере

2.3.5.1. Методика ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций по изображениям в крайнем ультрафиолете и магнитограммам SOHO адаптирована к данным SDO

В предшествующих работах был представлен новый метод ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций, основанный на оценках полного магнитного потока продольного поля на уровне фотосферы в постэруптивных аркадах и диммингах. Метод разработан по результатам анализа данных за 1996–2005 гг., полученных на телескопе крайнего ультрафиолета Extreme-ultraviolet Imaging Telescope (EIT) и магнитографе Michelson Doppler Imager (MDI) на борту Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Были получены эмпирические соотношения, позволяющие сразу после начала эрупции без данных о корональных выбросах оценивать основные параметры предстоящих возмущений космической погоды, в частности, интенсивность геомагнитных бурь и форбуш-понижений, а также времена их начала и пика. После 2010–2011 гг. требуемые данные о солнечных эрупциях поставляются телескопом Atmospheric Imaging Assembly (AIA) и магнитографом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) обсерватории Solar Dynamic Observatory (SDO). Для адаптации диагностики по данным SOHO к данным SDO использован относительно короткий интервал перекрывающихся детальных наблюдений EIT–AIA и MDI–HMI, а также наблюдения EIT ряда крупных эрупций за последующие годы с 12-часовым интервалом. Установлено, что при принятых порогах вариаций яркости и кросс-калибровочном коэффициенте 3.6–5.8 (5.0–8.2) для времени экспозиции AIA 2.0 с (2.9 с) на изображениях 195 Å EIT и 193 Å AIA выделяются практически одинаковые площадки аркад и диммингов. Установлено также, что для одних и тех же активных областей магнитные потоки продольного поля на уровне фотосферы, определенные по MDI, систематически превышают соответствующие потоки, измеряемые HMI, в 1.4 раза. На основании этих результатов эмпирические диагностические соотношения, полученные для SOHO, преобразованы для данных инструментов SDO. Представлены примеры диагностики ряда крупных эрупций текущего цикла солнечной активности по данным SDO. Как и прежде, предложенный метод применим для нерекуррентных возмущений космической погоды ГМБ и ФП, вызываемых эрупциями из центральной зоны солнечного диска, и для магнитных бурь при условии, что B_z-компонента в межпланетном магнитном облаке у Земли будет преимущественно отрицательной.

2.3.5.2. Статистический анализ соотношений между параметрами околоземных протонных возрастаний >100 МэВ и разными параметрами солнечной эруптивной активности

Проанализированы соотношения между различными комбинациями пиковых потоков и флюенсов солнечных микроволновых всплесков, записанных радиополяриметрами Нобеяма на частоте 35 ГГц в 1990–2015 гг., и соответствующими параметрами околоземных протонных возрастаний с энергиями выше 100 МэВ. Установлено, что для большинства событий наиболее высока корреляция между микроволновыми и протонными

флюенсами. Этот факт отражает зависимость полного числа протонов от общей продолжительности процесса их ускорения. В событиях с мощными вспышками коэффициенты корреляции протонных флюенсов с флюенсами микроволнового и мягкого рентгеновского потока выше, чем со скоростями КВМ. Результаты указывают на статистически больший вклад вспышечных процессов в ускорение высокоэнергичных протонов. Ускорение на ударных волнах оказывается менее значимым на высоких энергиях в событиях, связанных с мощными вспышками, хотя его вклад, вероятно, преобладает в более слабых событиях. Показано, что вероятность протонного возрастания прямо зависит от пикового потока, длительности и флюенса микроволнового всплеска, что может быть использовано для диагностики протонных возрастаний по данным мониторинга микроволнового излучения.

2.3.6. Развитие методик исследования солнечных явлений и процессов

2.3.6.1. Наблюдения хромосферы в линиях Hα и K CaII на хромосферных телескопах Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ

В Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) ИСЗФ выполняются квазирегулярные наблюдения солнечной хромосферы в линиях Hα водорода и K ионизованного кальция. Описания инструментов имеются на сайте Института [http://en.iszf.irk.ru/H-alpha_telescope, http://en.iszf.irk.ru/KCaII-telescope]. В табл. 3 содержатся сведения о статистике наблюдений за 2013–2016 гг.

Таблица 3. Наблюдения солнечной хромосферы на телескопах БАО ИСЗФ

Телескоп	Годы	2013	2014	2015	2016	Всего
Hα	дней	62	8	45	48	163
Hα	снимков	27 000	243	27 843	20 660	75 746
Hα	объем	546 Гб	4.79 Гб	571 Гб	382 Гб	1503.8 Гб
K CaII	дней	87	79	80	52	298
K CaII	снимков	749	711	720	468	2648
K CaII	объем	8.24 Гб	7.82 Гб	7.92 Гб	5.15 Гб	29.13 Гб

Уменьшение объема наблюдений в 2016 г. вызвано аварией с прекращением энергоснабжения телескопов в июле. Примеры изображений показаны на рис. 42, 43. Архив данных изображений полного диска Солнца в линии хромосферы K CaII находится в свободном доступе по адресу [ftp://ftp.iszf.irk.ru/k_calcium/All/], лучшие изображения — по адресу [http://en.iszf.irk.ru/Full-disk_solar_images_in_the_CaII_K_spectral_line].

Исследованы астроклиматические характеристики БАО с целью оценки эффективности использования наблюдательных данных для исследования тонкой структуры хромосферы и солнечных вспышек. С помощью аппаратно-программного комплекса, созданного Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, проведены компьютерная обработка и статистический анализ 12 479 цифровых изображений хромосферы Солнца в линии Hα, полученных на хромосферном телескопе полного диска БАО с помощью цифровой камеры Princeton Instruments 2048B в 2001–2002 гг. Для автоматизированной оценки качества изображений использован алгоритм оптимального окна, модифицированный для изображений солнечной хромосферы. Результаты анализа фильтрограмм показали большой общий процент изображений хорошего качества, частую встречаемость отличных и хороших изображений в поздние дневные часы. Доля отличных и хороших изображений составила около 50 % (в летний период более 60 %). Наилучшее для наблюдений время — с 11 до 14 ч. Подавление турбулентности в приземном слое в дневное время происходит в результате натекания из озера на сушу холодных потоков воздуха. Уникальность астроклиматических характеристик БАО объясняется существованием над Байкалом местной антициклональной зоны, обеспечивающей в районе обсерватории высокую стабильность атмосферы.

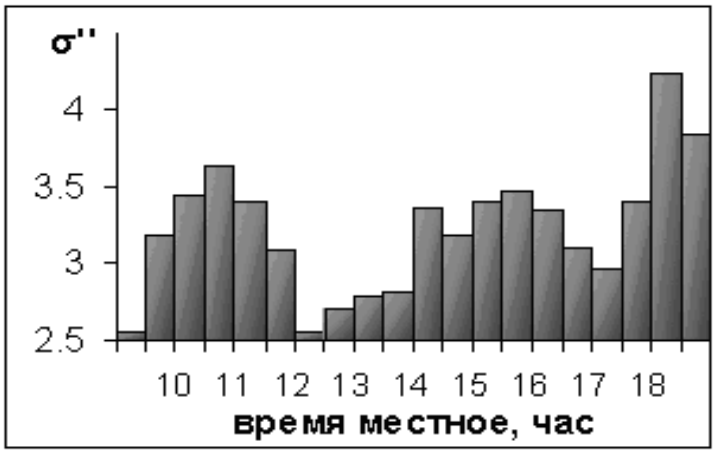


Рис. 41. Гистограмма распределения качества изображения в течение дня в мае–июне 2002 г.; σ — разрешение фильтрограмм в угловых секундах

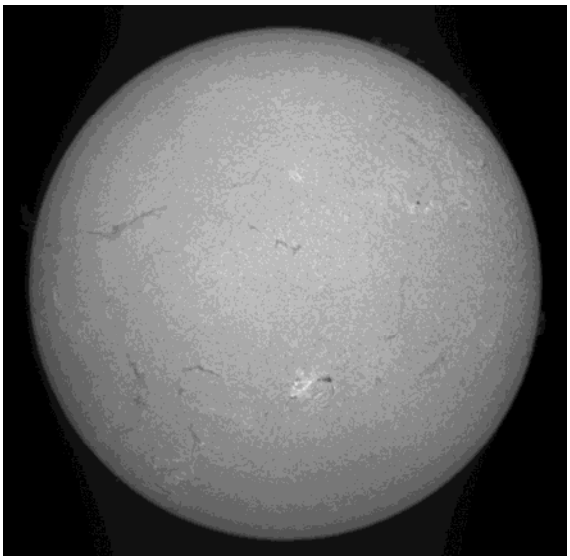


Рис. 42. Изображение Солнца в линии водорода Hα, полученное 8 августа 2015 г. на хромосферном телескопе БАО ИСЗФ

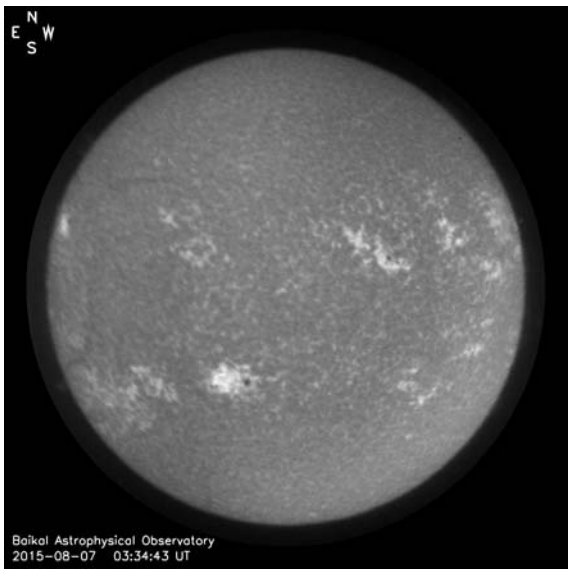


Рис. 43. Изображение Солнца в линии ионизованного кальция, полученное 7 августа 2015 г. на хромосферном телескопе БАО ИСЗФ

Разрабатывались методы анализа изображений, которые использовались для изучения закономерностей вспышечной активности.

Разработан метод построения световых кривых солнечных вспышек в линии Hα. Световые кривые дают возможность получить ряд важных параметров: синфазности, сопряженности вспышечных очагов, режима и продолжительности выделения энергии, позволяют делать заключения о физической природе вспышки и источнике энерговыделения. На построение световой кривой могут повлиять: способ измерения яркости, размер окна измерений, точность его «привязки» к изображению и др. Исключительно важное значение для построения световой кривой имеет выбор реперных участков невозмущенной хромосферы, яркость которой подвержена квазипериодическим колебаниям акустической, гравитационной и МГД-природы. В связи с этим яркость выбранных участков должна иметь минимальные флуктуации и не должна коррелировать со вспышечной областью. Проведенное на примере компактной внепятенной вспышки 5 июля 2001 г. исследование показало, что из отобранных 25 реперных областей только 8 % могли быть использованы для этой цели. Установлено, что световые кривые, построенные по изменению средней яркости вспышки, не отражают реальный процесс развития вспышечного процесса. Для вспышек и вспышечных узлов с малыми угловыми размерами световая кривая строится с большими ошибками и существенно зависит от размера окна измерений. Достоверную картину дают световые кривые, построенные по максимальной яркости вспышки, нормированной к максимальной или средней яркости невозмущенной хромосферы. Разработанный метод может быть применен для исследования солнечных вспышек всех классов площади.

По наблюдениям в линии Hα исследованы структура и развитие внепятенных вспышек, зарегистрированных в БАО ИСЗФ СО РАН 16 марта 1981 г., 28 июня 2001 г. (две вспышки), 28 мая и 5 июня 2002 г. Подробно изучена морфология хромосферных активизаций во время вспышек. Установлено, что наибольшая частота предвспышечных активизаций приходится на 10–60 мин до начала вспышки. В предвспышечный процесс вовлекаются обширные поля тонкой хромосферной структуры, волокна как в области вспышки, так и на значительном удалении от нее. Обнаружены неизвестные ранее или редко встречающиеся виды предвспышечных активизаций. Установлено, что причиной эволюционных, предвспышечных, а также вспышечных возмущений хромосферы являются крупномасштабные изменения структуры магнитного поля спокойной области. Подтверждена тесная пространственная связь вспышечных лент и узлов с границами хромосферной и магнитной сеток. Обнаружено, что узлы и очаги внепятенных вспышек, как правило, возникают в непосредственной близости от усиленных магнитных холмов с напряженностью >80 Гс, в которых во время вспышек наблюдаются существенные изменения напряженности магнитного поля (рис. 44). В развитии вспышек определяющую роль играет топология магнитного поля «спокойной» области. Эмиссия вспышек распространяется от одного магнитного холма к другому, а также вдоль тоннелей, образованных системами темных арочных структур (волокон). Вспышечные ленты могут возникать на значительном удалении от линии раздела полярности, при этом расхождения лент не наблюдается.

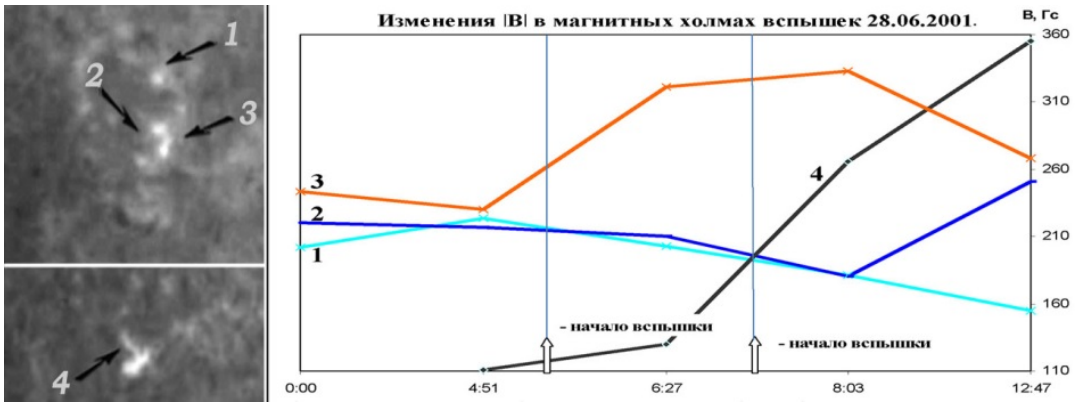


Рис. 44. Изменения магнитного поля в магнитных холмах во время внепятенных вспышек 28 июня 2001 г.

Характер изменений пространственно-временных параметров вспышечных структур указывает на причинно-следственную связь между элементами вспышек и корональным источником. На основе современных моделей солнечных вспышек дана интерпретация полученных результатов. В настоящее время наиболее разработанной моделью солнечной вспышки является стандартная модель CSHKP, объединяющая разные наблюдательные и теоретические схемы. Эта модель неплохо описывает завершающую фазу расходящихся вспышечных лент, однако применимость этой модели к начальной и, может быть, импульсной фазе вспышки нельзя считать обоснованной. Поэтому была предложена следующая эмпирическая модель возникновения вспышки. Перед вспышкой волокно, связанное с фотосферой многочисленными нитями (barbs, threads), в результате сдвиговых течений в фотосфере, сближения силовых линий поля и возникшей неустойчивости отрывается и начинает подниматься. Это приводит к магнитному пересоединению нитей и образованию вспышечного каспа. После начала магнитного пересоединения над линией инверсии в канале волокна образуются винтовые силовые линии, которые начинают подниматься вверх. Далее процесс идет в соответствии со стандартной моделью.

Представленная эмпирическая модель позволила объяснить основные этапы развития внепятенной вспышки 16 марта 1981 г. и сопровождающий ее яркий вспышечный «стример», распространявшийся над линией раздела полярности со скоростью порядка 400 км/с. Его появление в рамках стандартной модели объяснить невозможно, если не внести ряд существенных дополнений.

Создана электронная база, включающая 123 807 солнечных вспышек, наблюдавшихся в линии Hα в период с 1972 по 2010 г. В основу легли каталоги Solar Geophysical Data (SGD) и Квартального бюллетеня солнечной активности (Quarterly Bulletin on Solar Activity). С помощью разработанного пакета программ проведена статистическая обработка данных.

Установлено, что в отличие от результатов, полученных ранее, подавляющее большинство происходящих на Солнце вспышек составляют вспышки малой мощности (более 90 %), из которых самыми многочисленными являются балла SF (64 %). С ростом оптического балла происходит постепенное перераспределение числа вспышек в сторону увеличения класса яркости.

Список использованных источников:

1. Skomorovsky V.I., Firstova N.M. The Large Solar Vacuum Telescope: The optical system, and first spectral observations // Solar Phys. 1996. V. 163, iss. 2. P. 209–222.

2. Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. 2012. DOI: 10.1007/s11207-011-9841-3.

3. Enome S. Nobeyama Radio Heliograph // Flare Physics in Solar Activity Maximum 22: Proceedings of the International SOLAR-A Science Meeting held at Tokyo, Japan, 23–26 October 1990, dedicated to the memory of the late Professor K. Tanaka / Edited by Y. Uchida, R.C. Canfield, T. Watanabe, and E. Hiei. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1991. P. 330. (Lecture Notes in Physics. V. 387).

4. Golub L., Bookbinder J., Deluca E., Karovska M., Warren H., Schrijver C. J., Shine R., Tarbell. T., Title A., Wolfson J., Handy B., Kankelborg C. A new view of the solar corona from the Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) // Physics of Plasmas. 1999. V. 6, iss. 5. P. 2205–2216.

5. Murdin P. Solar-B. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics / Edited by P. Murdin. Bristol: Institute of Physics Publ., 2001. Article 4762.

6. Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., et al. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) // Solar Phys. 1995. V. 162, iss. 1–2. P. 357–402.

2.4. Радиоастрономические исследования динамических процессов в солнечной короне

2.4.1. Исследование солнечной вспышки 10 марта 2002 г.

В рамках проекта была детально исследована так называемая «холодная» солнечная вспышка 10 марта 2002 г. Особенностью этой вспышки был крайне низкий уровень мягкого рентгеновского излучения при достаточно высокой интенсивности жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения (что нетипично для вспышек). Это свидетельствует об эффективном механизме ускорения электронов до высоких энергий, но неэффективном механизме нагрева плазмы в данном событии.

Для исследования вспышки 10 марта 2002 г. были использованы материалы наблюдений с помощью разных инструментов в различных спектральных диапазонах — радионаблюдений (Сибирский солнечный радиотелескоп и радиогелиограф Нобеяма), рентгеновских наблюдений (космический телескоп «Конус-Винд»), фотосферные магнитограммы и др. (рис. 45.). Был также использован пакет программ для трехмерного моделирования радио- и рентгеновского излучения солнечных вспышек GX Simulator, разработанный участниками проекта [1]. Целью работы было подобрать сценарий развития вспышки, конфигурацию магнитного поля и прочие параметры вспышечной области, которые обеспечили бы согласие результатов моделирования со всеми доступными наблюдениями.

Показано, что в основе вспышечного процесса лежало взаимодействие двух корональных магнитных петель (большой и малой, рис. 46); количество ускоренных электронов в данных петлях было примерно одинаковым. Тепловое (мягкое) рентгеновское излучение генерировалось преимущественно в малой петле. Однако из-за ее малого объема интенсивность излучения была невысокой. В то же время в большой петле ускоренные электроны были сосредоточены преимущественно в корональной части петли и практически не вызывали хромосферного испарения, что и привело к отсутствию горячей плазмы. Показано, что ускоренные электроны имели анизотропное питч-угловое распределение с максимумом в направлении вдоль магнитного поля.

Полученные результаты важны для дальнейшего развития теории солнечных вспышек. Кроме того, в данной работе впервые в полном объеме были использованы возможности системы моделирования GX Simulator: модельные параметры подбирались так, чтобы воспроизвести весь набор имеющихся наблюдательных данных. Одной из основных задач проекта является разработка теоретических методов и компьютерных средств для диагностики солнечных активных процессов по радионаблюдениям (в том числе в приложении к будущим многоволновым наблюдениям Сибирского радиогелиографа); указанная работа представляет собой важный шаг в разработке и отладке подобных методов и средств.

Публикации:

Fleishman G.D., Pal’shin V.D., Meshalkina N., Lysenko A.L., Kashapova L.K., Altyntsev A.T. A cold flare with delayed heating // Astrophys. J. 2016. V. 822, id. 71.

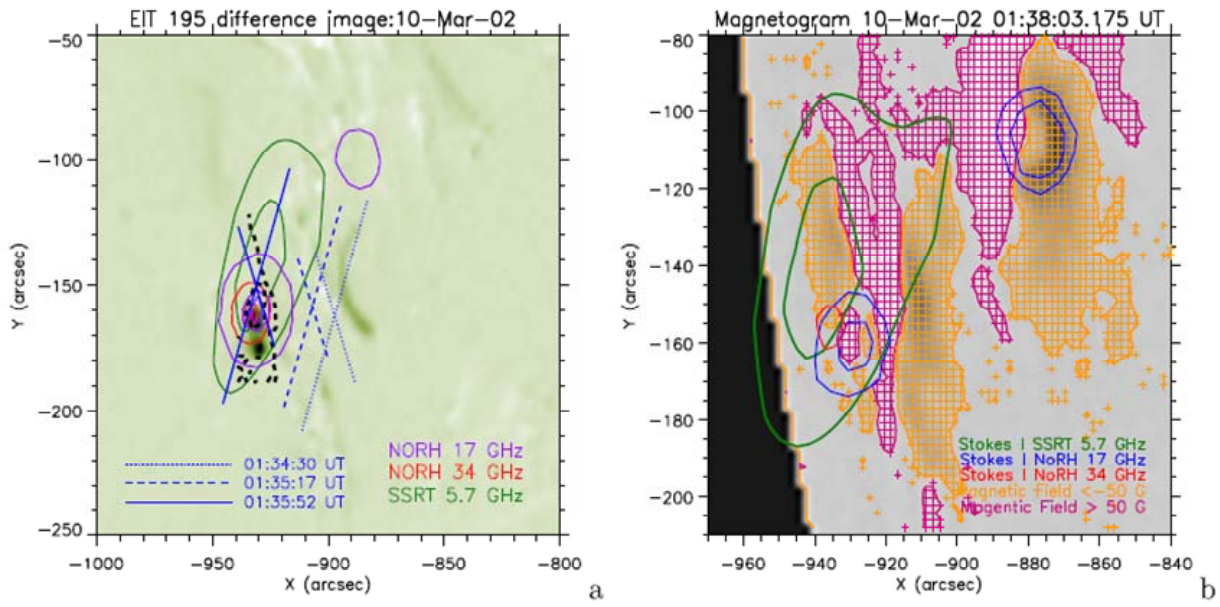


Рис. 45. Изображения вспышки 10.03.2002 в различных спектральных диапазонах

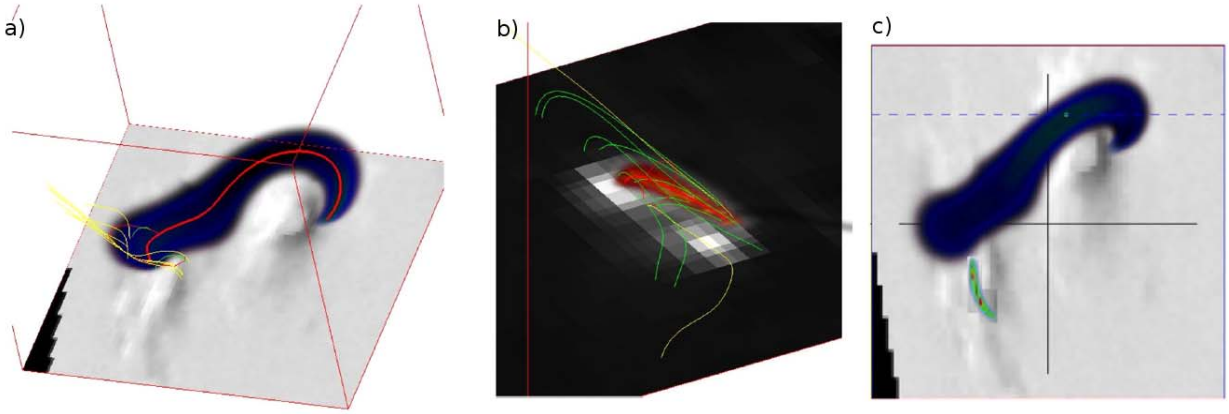


Рис. 46. Модель вспышки 10.03.2002 в программе GX Simulator: *a* — большая петля (вид в перспективе); *b* — малая петля (вид в перспективе); *c* — большая и малая петли (вид сверху)

2.4.2. Исследование квазипериодических пульсаций в солнечной вспышке 18 августа 2012 г.

Была детально исследована вспышка, произошедшая в районе солнечного лимба 12 августа 2012 г. Особенностью данной вспышки было наличие квазипериодических колебаний (с периодом около 10 с), наблюдавшихся как в микроволновом, так и в рентгеновском диапазонах.

Для исследования вспышки 12 августа 2012 г. были использованы наблюдения широкополосных спектрополяриметров радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, пространственно-разрешенные наблюдения на нескольких частотах в микроволновом диапазоне на 10-антенном макете Сибирского радиогелиографа, микроволновые наблюдения радиогелиографа Нобеяма, рентгеновские наблюдения космического телескопа «Конус-Винд» и др. (рис. 47, 48). Использовалось также численное моделирование с помощью программного пакета GX Simulator [1].

В результате было определено положение источника квазипериодических колебаний и установлены параметры плазмы в источниках радиоизлучения. Установлена структура вспышечной области, которая включала две системы вспышечных петель. Показано, что квазипериодические всплески, по всей видимости, обусловлены модуляцией процесса

ускорения частиц в области первичного энерговыделения (например, под влиянием МГД-колебаний). Численное моделирование показало, что даже относительно небольшие вариации спектрального индекса ускоренных электронов могут объяснить наблюдаемые колебания интенсивности микроволнового излучения.

Публикации:

Altyntsev A., Meshalkina N., Mészárosová H., Karlický M., Palshin V., Lesovoi S. Sources of quasi-periodic pulses in the flare of 18 August 2012 // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 445–463.

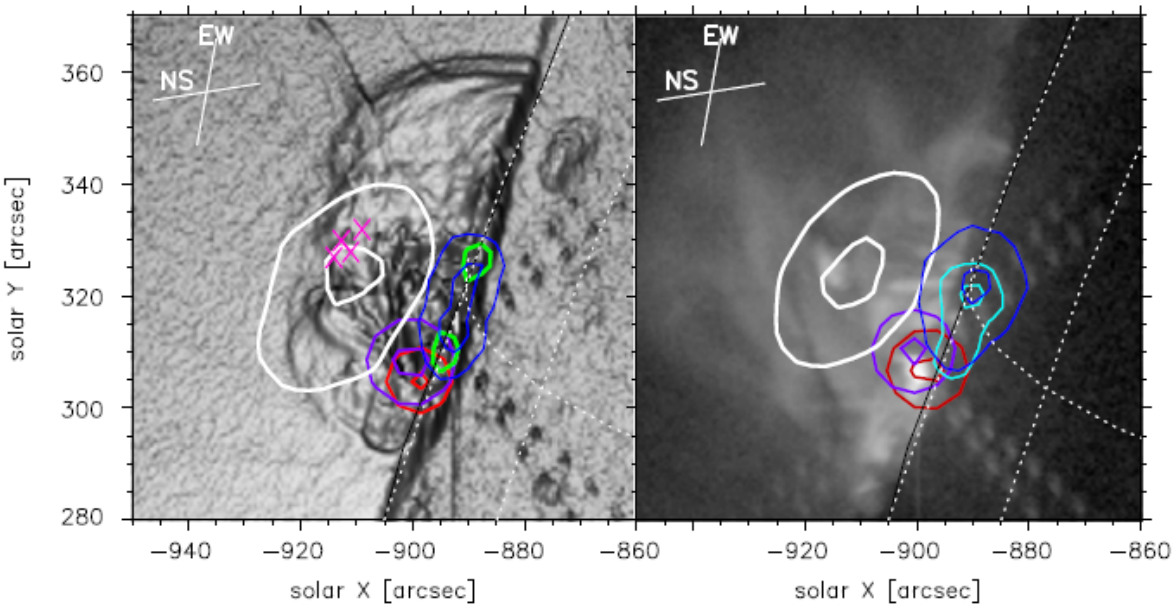


Рис. 47. Изображения вспышки 12.08.2012 в различных спектральных диапазонах

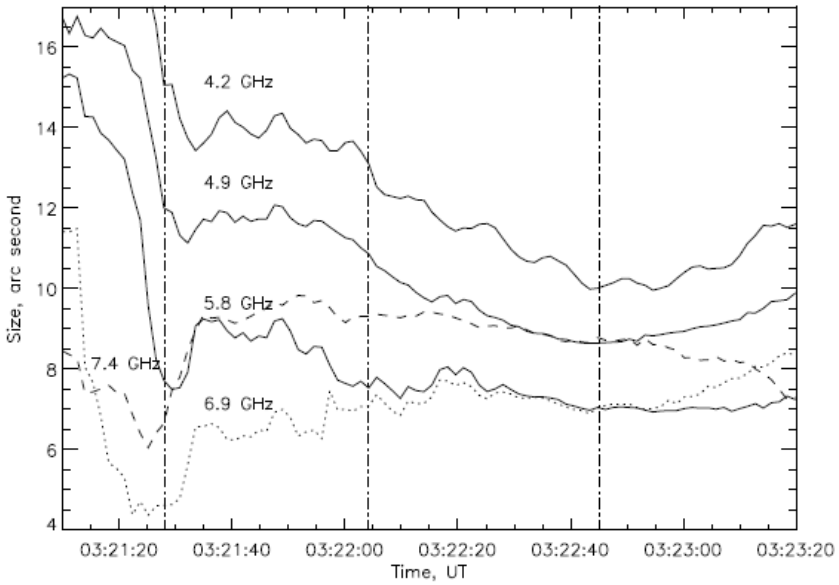


Рис. 48. Размеры микроволновых источников во вспышке 12.08.2012 в зависимости от времени (на разных частотах) по наблюдениям 10-антенного прототипа Сибирского радиогелиографа

2.4.3. Моделирование радиоизлучения магнитных жгутов в солнечных активных областях

Наблюдения на ССРТ, РАТАН-600 и других радиотелескопах показали, что в солнечных активных областях перед вспышками нередко возникают необычные микроволно-

вые источники, расположенные над нейтральной линией магнитного поля. Такие источники могут служить предвестниками солнечных вспышек; в то же время их природа до сих пор не была установлена.

В рамках данного проекта было проведено моделирование микроволнового излучения магнитных жгутов (flux ropes) — структур с повышенной напряженностью магнитного поля и плотностью плазмы, формирующихся в солнечной короне над нейтральными линиями фотосферного магнитного поля. Для моделирования параметров таких жгутов и их временной эволюции использовалась трехмерная численная МГД-модель, разработанная в Каталическом университете Лёвена (Бельгия), — наиболее совершенная и реалистичная на данный момент (рис. 49) [2]. Результаты МГД-моделирования затем использовались для вычисления гирорезонансного и тормозного излучения в микроволновом диапазоне [3], что позволило исследовать структуру и временную эволюцию микроволновых изображений на различных частотах (рис. 50).

Показано, что для магнитных жгутов в активных областях с сильным магнитным полем характерно интенсивное гирорезонансное излучение с яркостной температурой до нескольких миллионов градусов. Высокая напряженность магнитного поля в жгуте (которая может быть даже выше, чем на фотосфере) обеспечивает высокую частоту излучения — с типичными значениями порядка 5–10 ГГц. Таким образом, показано, что магнитные жгуты в солнечных активных областях являются наиболее вероятной причиной формирования наблюдаемых микроволновых источников над нейтральной линией. В частности, впервые удалось воспроизвести характерный спектр таких источников (с резким спадом на частотах выше некоторой предельной частоты). Полученные результаты имеют большое значение для планирования и анализа будущих наблюдений на Сибирском радиогелиографе и для исследования предвспышечных процессов.

Публикации:

Kuznetsov A.A., Keppens R., Xia C. Synthetic radio views of simulated solar flux ropes // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 823–845.

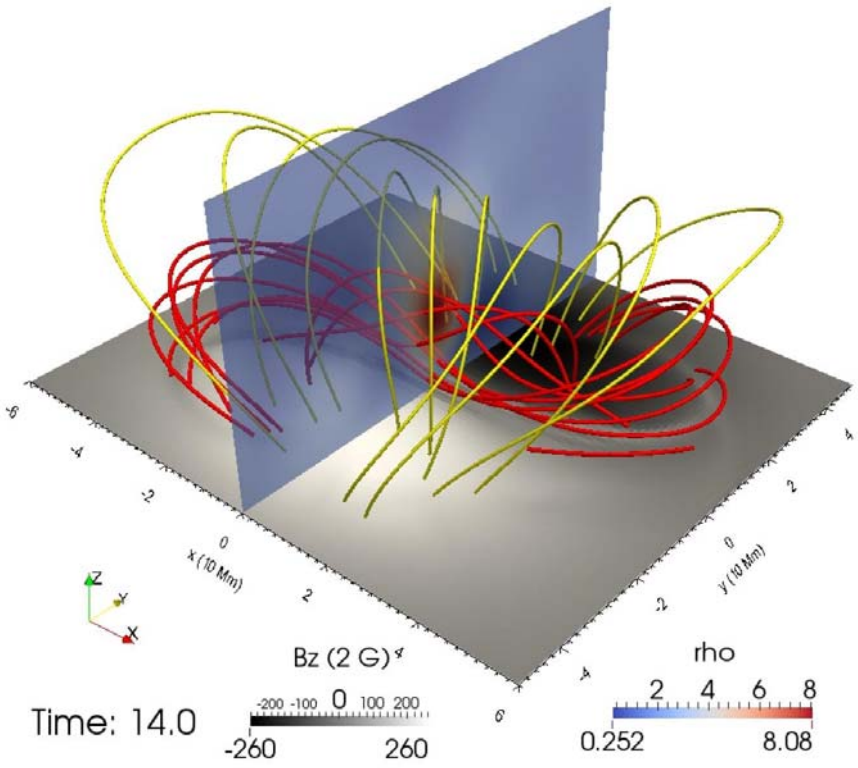


Рис. 49. Структура магнитного жгута в активной области

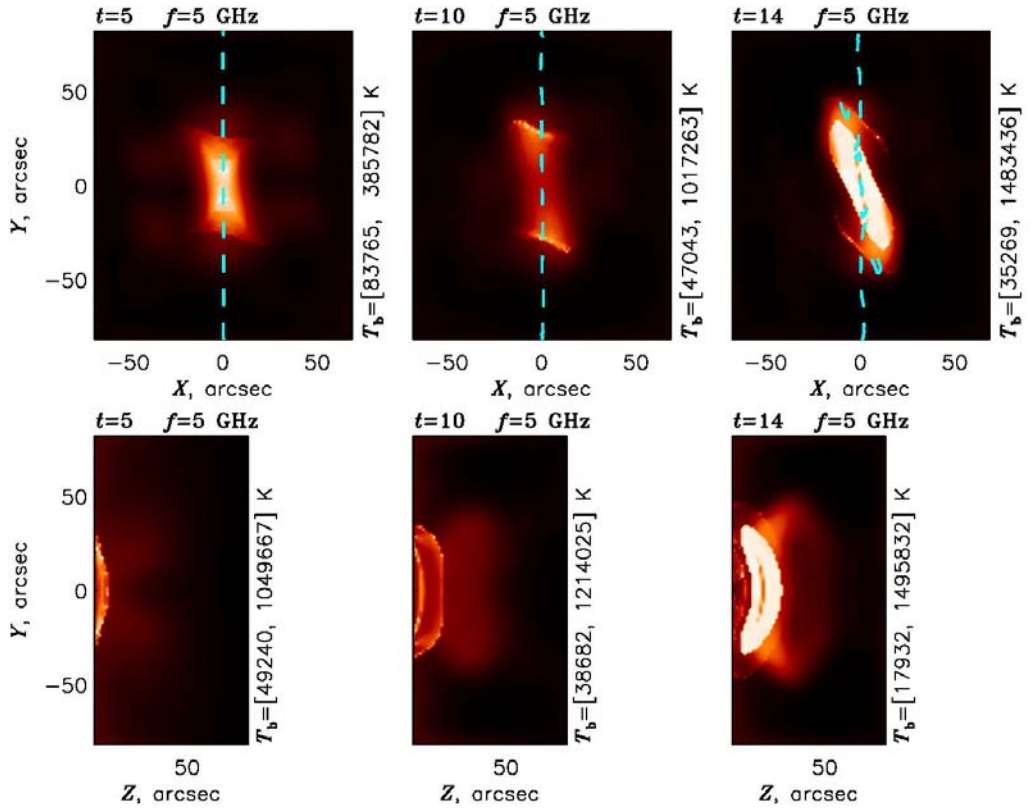


Рис. 50. Вычисленные микроволновые изображения активной области на частоте 5 ГГц в три разных момента времени: вверху — вид сверху, внизу — вид сбоку

2.4.4. Исследование микроволновых всплесков III типа

Всплески III типа, т. е. узкополосные всплески с быстрым частотным дрейфом, в микроволновом диапазоне потенциально позволяют исследовать быстрые процессы в области первичного вспышечного энерговыделения. Тем не менее, природа таких всплесков до сих пор точно не установлена.

В рамках данного проекта были исследованы всплески, наблюдавшиеся во время солнечной вспышки 10 августа 2011 г. Использовались наблюдения с помощью Сибирского солнечного радиотелескопа (двумерные изображения на частоте 5.7 ГГц), широкополосных спектрополяриметров радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, радионаблюдения на РАТАН-600 (одномерные сканы на нескольких частотах) и др. (рис. 51). Был разработан и применен оригинальный метод для восстановления координат радиоисточников по данным РАТАН-600.

Показано, что источники микроволновых всплесков III типа были расположены вблизи области взаимодействия вспышечных петель. Размер источника излучения был максимален на частоте 5.1 ГГц независимо от спектральных характеристик всплесков. Положения источников всплесков на двух различных частотах (различающихся на 200 МГц по наблюдениям на Сибирском солнечном радиотелескопе) различаются на 2–4″.

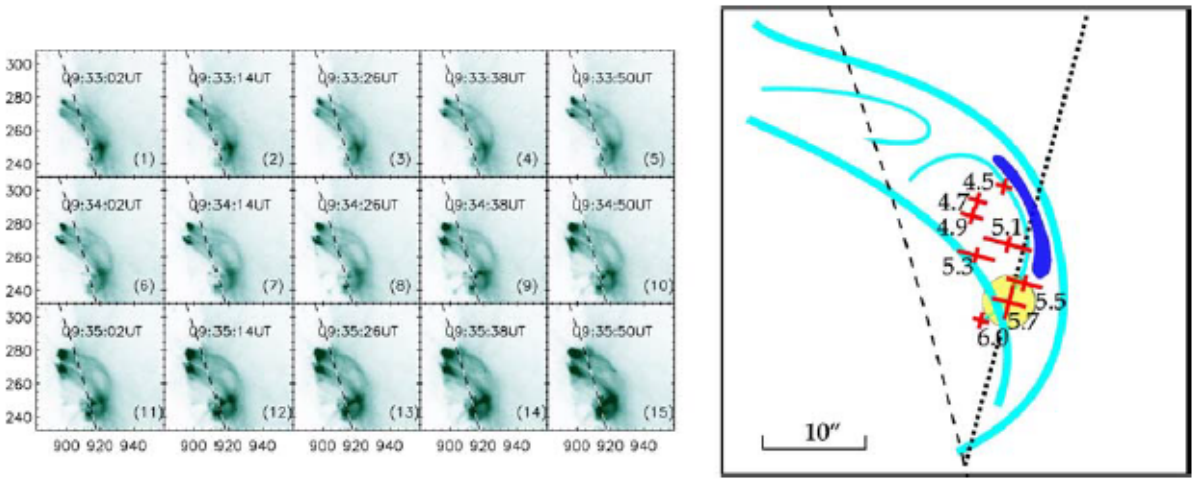


Рис. 51. Эволюция активной области во вспышке 10.08.2011 по данным наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне (слева) и схематическое расположение источников микроволновых всплесков (справа)

Публикации:

Zhdanov D., Lesovoi S., Tokhchukova S. Sources of type III solar microwave bursts // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2. P. 15–27.

2.5. Развитие оптических и радиофизических методов в области астероидно-кометной опасности, техногенного засорения и экологии космического пространства

2.5.1. Наблюдения космических объектов в точке либрации L2 системы Солнце–Земля. Исследование возможности построения орбиты для объектов вблизи точки Лагранжа L2 на основе измерений оптическими телескопами Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН

В ближайшем будущем планируется запуск международной орбитальной астрофизической обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» («Спектр-РГ»). Космический аппарат «Спектр-РГ» предполагается доставить в окрестность точки либрации L2 системы Солнце–Земля и удерживать на квазиустойчивой орбите [1]. Для обеспечения выполнения научной программы проекта необходимо поддержание орбиты аппарата, что предполагает получение информации о текущих параметрах его движения. Опыт контроля положения космических аппаратов (КА), находящихся на орбитах вблизи либрационной точки L2, до настоящего времени отсутствовал, что предопределило необходимость выполнения данной работы. В 2014–2016 гг. в рамках работ по оценке возможностей оптических телескопов Саянской солнечной обсерватории в составе комплекса наземной оптической поддержки космической обсерватории «Спектр-РГ» были проведены наблюдения КА Gaia [2], который находится на орбите в окрестности точки либрации L2 системы Солнце–Земля, схожей с предполагаемой орбитой КА «Спектр-РГ». В результате выполнения работы получены астрометрические и фотометрические наблюдения КА Gaia на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК и 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ВМ.

На рис. 52 показано изменение блеска КА Gaia. Видимый блеск за все время наблюдений изменялся в диапазоне от 20.7 до 22 звездной величины, за исключением 26 февраля 2014 г. В это время КА проходил тестовые испытания, а угол ориентации на Солнце был равен 0°. Блеск КА Gaia 26 февраля 2014 г. составил 14.4 звездной величины (не показано на рисунке), что согласуется с наблюдениями Европейского космического агентства [3].

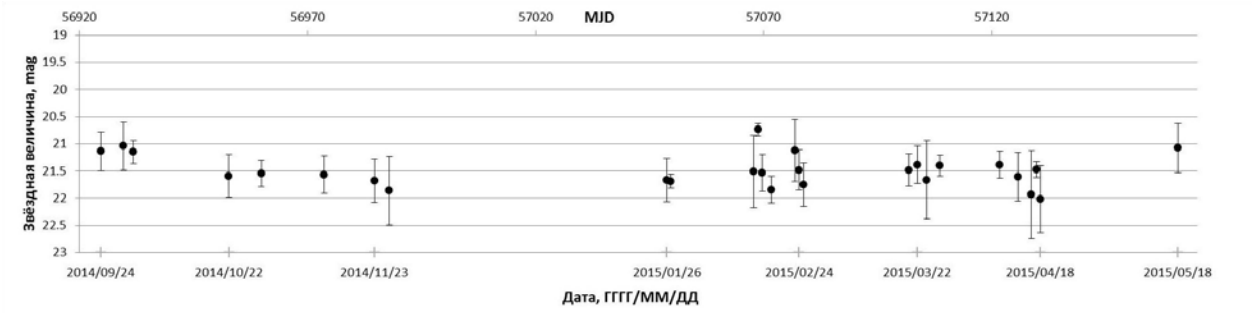


Рис. 52. Видимый блеск КА Gaia в период наблюдений с 24 сентября 2014 г. по 18 мая 2015 г.

По результатам измерений показано, что величины прямого восхождения и склонения определяются с точностью 1 угл. сек. дуги при видимом блеске КА до 22 звездной величины. Получены оценки расчетного блеска КА «Спектр-РГ» и массив данных оптических позиционных измерений для прогнозирования движения КА в окрестности точки либрации L2 системы Солнце–Земля.

Для оценки возможности применения данных в задаче прогноза движения КА были вычислены орбиты по нескольким группам измерений. В качестве начальных параметров в задаче определения орбиты использовались элементы с ресурса JPL's HORIZONS system [4]. Далее использовались элементы, рассчитанные по собственным измерениям. По набору серий измерений на интервале несколько суток вычислялась орбита, позволяющая контролировать текущее положение КА. В расчетах применялась модель движения, в которой учитываются гравитационное воздействие Земли, Солнца, Луны и планет Солнечной системы. Не учитывалось влияние светового давления и корректирующих импульсов для удержания аппарата на орбите.

На рис. 53 приведены результаты расчетов по набору измерений с 20 по 27 марта 2015 г. до и после уточнения орбиты.

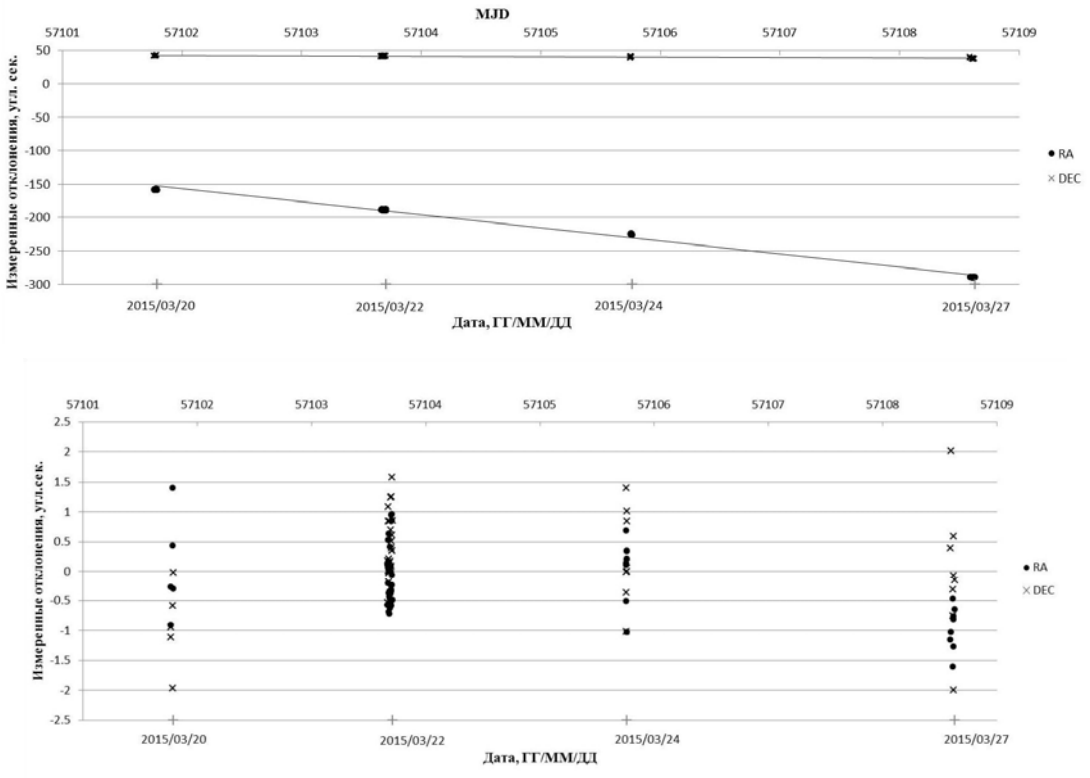


Рис. 53. Измеренные отклонения от расчетной орбиты КА Gaia: верхняя панель — до уточнения орбиты, нижняя панель — после уточнения орбиты

С применением упрощенной модели сил и в условиях отсутствия информации о корректирующих импульсах отклонения расчетных положений спутника от реальных за время отсутствия измерений составили менее половины поля зрения телескопа АЗТ-33ИК (≈4 угл. мин). Такая точность позволяет контролировать КА в окрестности точки либрации L2 системы Солнце–Земля с темпом измерений несколько раз месяц.

2.5.2. Исследование вопросов применения существующих фотометрических звездных каталогов для обработки фотометрических измерений космических объектов

Важнейшим этапом обработки фотометрических измерений является преобразование инструментальных звездных величин наблюдаемого объекта в какую-либо стандартную фотометрическую систему, характеризуемую набором эффективных длин волн и полушириной соответствующих полос пропускания, в которых выполняются измерения. Для каждой фотометрической системы должен быть определен набор первичных фотометрических стандартов — звезд с точно измеренной звездной величиной в каждой полосе. Наличие фотометрических стандартов дает возможность сводить наблюдения, выполненные разными наблюдателями в своих инструментальных системах, к одной — стандартной фотометрической системе. В настоящее время система UBVRI Johnson–Kron–Cousins является наиболее широко используемой широкополосной стандартной фотометрической системой.

Возможность проводить фотометрическую калибровку измерений объекта по стандартным звездам, попадающим в поле зрения телескопа вместе с объектом, освобождает от дополнительных измерений звезд и позволяет скорректировать изменения погодных условий. Однако существующие каталоги фотометрических BVRI-стандартов не гарантируют попадание в ПЗС-кадр стандартных фотометрических звезд из-за небольшого числа содержащихся в них звезд (Landolt [5], Stetson [6]), а также из-за неравномерности распределения звезд по небесной сфере (GSPC) [7]). Сравнительные характеристики каталогов, содержащих фотометрические звездные стандарты, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнительные характеристики каталогов фотометрических звездных стандартов

Каталог	Количество звезд	Спектральные полосы	Диапазон зв. вел
Landolt, 1992, 2003	930	UBVRI	9^m–16^m
Landolt, Clem, 2003	>40 000	UBVRI	10^m–22^m
Тянь-Шань	13 586	WBVR	0^m–10^m
GSPC II	500 000	BVR	14^m–19^m

Современные звездные каталоги содержат сотни миллионов звезд и обеспечивают высокую астрометрическую точность, но ни один из них не является фотометрическим, и приводимая в них фотометрия требует тщательного анализа.

В табл. 5 приводятся сравнительные характеристики наиболее крупных звездных каталогов, содержащих фотометрические данные в полосах пропускания, близких к стандартным.

Таблица 5. Сравнительные характеристики каталогов, содержащих фотометрические данные в полосах пропускания, близких к стандартным

	Год создания	Количество звезд	Диапазон зв. вел.	Фотометрия	Источник
TYCHO-2	2000	2 539 913	8^m–12^m	B_T, V_T	Hipparcos
USNO-B1.0	2003	1 045 175 762	до 21^m	B1, R1, B2, R2, I	POSS*
APASS**	2010–2016	61 176 401	7^m–17^m	B, V, g, r, i.	ПЗС наблюдения на обсерваториях CTIO и New Mexico
UCAC-4	2012	113 780 093 (фотометрия для 50 000 000)	10^m–16^m	B, V, g, r, i	APASS
URAT-1	2015	228 276 482 (фотометрия для 37 000 000)	7^m–17^m	B, V, g, r, i	APASS
NOMAD***	2005	1 117 612 732		B,V, R, J, H, K	Hipparcos, TYCHO-2, UCAC-2, USNO-B 1.0, YB6 Catalog (USNO, unpublished), 2MASS

*POSS — Palomar Observatory Sky Survey (фотографические наблюдения).

**APASS — American Association of Variable Star Observers (AAVSO) Photometric All-Sky Survey (ПЗС наблюдения).

***NOMAD — Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (Объединенные астрометрические данные Военно-морской обсерватории США (USNO).

USNO-B1 является одним из самых больших звездных каталогов, по количеству звезд уступающим только NOMAD. Последняя версия этого каталога USNO-B1.0 содержит 1 045 175 762 звезд до 21-й звездной величины [8]. Размер каталога гарантирует попадание фотометрических звезд в ПЗС-кадры, содержащие изображение объекта, что позволяет осуществлять фотометрическую калибровку по звездам поля. Однако отсутствие полосы V и отличие полос B и R от стандартной фотометрической системы не позволяет впрямую использовать этот каталог для калибровки фотометрических измерений. Для установления соответствия между фотометрическими полосами USNO и стандартной фотометрической системой Johnson–Kron–Cousins из каталога USNO были выбраны звезды, пересекающиеся с каталогом Ландольта, и их звездные величины в разных фильтрах сравнивались со стандартными (рис. 54). В качестве величины V, отсутствующей в каталоге USNO, было взято значение, приведенное в [9]:

$$V=0.125(5R+3B). \qquad (1)$$

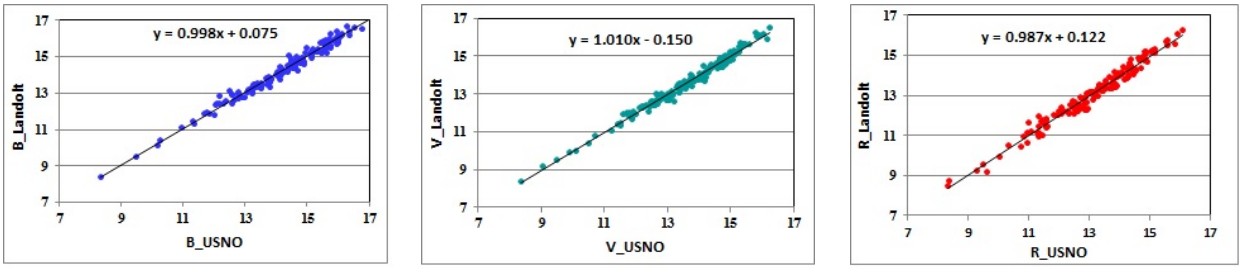


Рис. 54. Сравнение фотометрической системы USNO-B1 со стандартной фотометрической системой UBVRI.

Получены уравнения перехода из системы каталога USNO-B1 в систему BVRI Johnson–Kron–Cousins:

$B=0.998\ B_{USNO}+0.075$,

$V=1.010\ V_{USNO}-0.150$, где $V_{USNO}=0.125(5\ R_{USNO}+3\ B_{USNO})$,

$R=0.987\ R_{USNO}+0.122$,

Стандартные отклонения: $\sigma_B=0.216$, $\sigma_V=0.187$, $\sigma_R=0.250$.

USNO CCD Astrograph Catalog (UCAC) является первым современным звездным каталогом полного неба высокой плотности, который основан не на фотографических изображениях неба, а на ПЗС-наблюдениях. Наблюдения для USNO CCD Astrograph Catalog (UCAC), начались в 1998 г. и были завершены в 2004 г. После двух промежуточных версий, которые не покрывали все небо, в 2009 г. был выпущен первый полный каталог (UCAC-3), а затем, в 2012 г., окончательная версия UCAC-4.

Для сопоставления каталогов UCAC-4 и Landolt из последнего выбраны 240 звезд с блеском слабее 9^m. Звездные величины в полосах B, V (Landolt) и B_{UCAC}, V_{UCAC} (UCAC-4) сравнивались без учета цвета звезды, для полосы R была получена аппроксимационная формула

$$R_{UCAC}=r-0.203(r-i)-0.179. \qquad (2)$$

Зависимость между звездными величинами двух каталогов представлена на рис. 55.

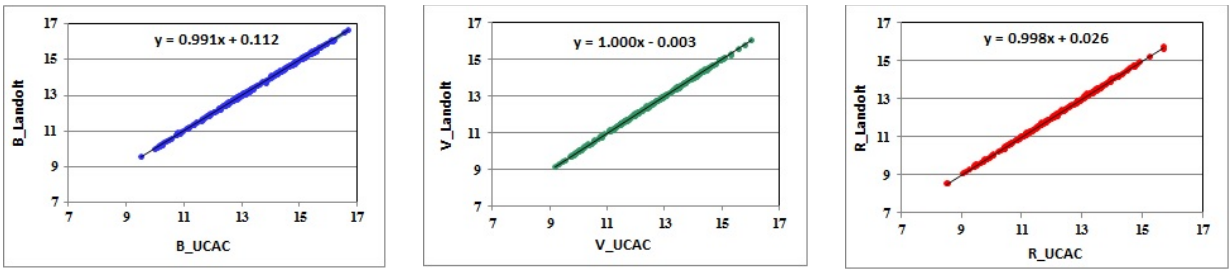


Рис. 55. Сравнение фотометрической системы UCAC-4 со стандартной фотометрической системой UBVRI

Уравнения перехода из системы каталога UCAC-4 в систему BVRI Johnson–Kron–Cousins:

$B=0.991\ B_{UCAC}+0.112$,

$V=1.000\ V_{UCAC}-0.003$,

$R=0.998\ R_{UCAC}+0.026$.

Стандартные отклонения: $\sigma_B=0.029$, $\sigma_V=0.024$, $\sigma_R=0.030(-0.5<(r-i)<1.2)$.

Таким образом, был проведен анализ звездных каталогов с максимальным покрытием небесной сферы, содержащих фотометрические данные в некоторых из стандартных (или близких к ним) полос пропускания. По результатам сопоставления более 200 звезд из каталога Ландольта, принятого за эталонный, с каталогами USNO-B1 и UCAC-4 получены формулы преобразования звездных величин этих каталогов в стандартную систему и определена точность полученных преобразований. С использованием этих преобразований ошибка определения блеска по каталогу USNO-B1 составляет около 0.2 звездных величин, по каталогу UCAC-4 — 0.02–0.04 звездных величины.

2.5.3. Совершенствование методов обработки данных оптических измерений при координированных наблюдениях КО радио- и оптическими средствами

На инструментальной базе ИСЗФ СО РАН создан радиооптический комплекс для координированных измерений КО на низких орбитах. Этот комплекс включает в себя Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) и оптический телескоп АЗТ-33ИК. Совместное использование радиолокационных и оптических средств позволяет усилить пре-

имущества систем каждого типа при наблюдениях КО. Помимо измерений траекторных параметров КО, существует возможность получения некоординатной информации. С помощью радара измеряется эффективная площадь рассеяния (ЭПР), а телескоп позволяет регистрировать оптический сигнал, вызванный отраженным от КО солнечным излучением.

Одним из примеров координированных наблюдений, в которых измерялись в том числе некоординатные параметры КО, стали измерения во время серии космических экспериментов (КЭ) «Радар–Прогресс». КЭ «Радар–Прогресс» был направлен в первую очередь на исследование процессов воздействия на ионосферную плазму, вызванных контролируемым включением двигательных установок на борту транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» [10]. Ведущая роль в диагностике состояния ионосферы отводилась ИРНР ИСЗФ СО РАН [11]. В то же время при включении двигателей проявляются другие эффекты, которые недоступны для радарных измерений. Движение КА происходит по низкой орбите на удалении около 300–400 км от поверхности Земли — на таком расстоянии имеется возможность получить достаточно детальное изображение если не самого КА, то области вокруг КА, связанной с выбросом вещества в процессе работы двигателей.

Оптические измерения, проведенные во время КЭ, показали, что можно выделить два сильно отличающихся типа оптического сигнала, регистрируемого во время эксперимента. Во всех экспериментах отсчет времени привязывался к моменту включения сближающе-корректирующего двигателя (СКД) на борту ТГК «Прогресс». Длительность работы двигателя варьировалась в разных сеансах наблюдений и составляла примерно 7–8 с. На рис. 56 приведена последовательность изображений, полученных в широкоугольной оптоэлектронной системе на телескопе АЗТ-33ИК во время включения СКД в сеансе наблюдений 01.09.2010. Под каждым изображением указана разность $T–T_0$ (в секундах) между моментом начала экспозиции и моментом включения СКД.

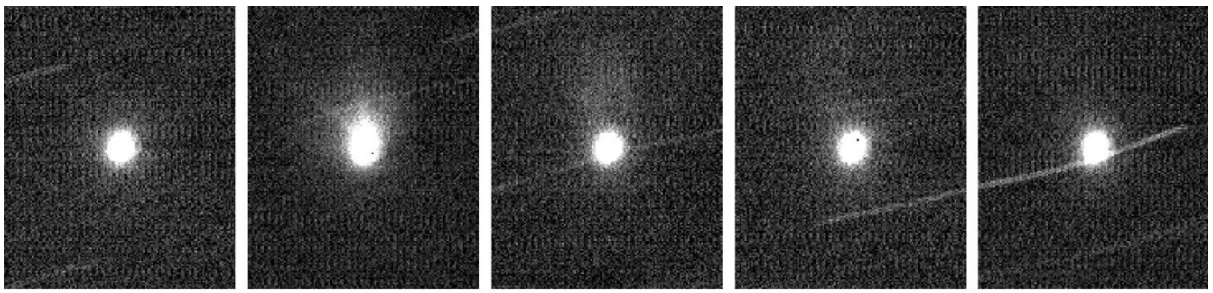


Рис. 56. Пример оптического сигнала, регистрируемого во время работы СКД (01.09.2010). Время экспозиции 0.5 с

На рис. 56 видно, что, начиная с момента включения СКД, регистрируется очень слабый оптический сигнал в виде слабоконтрастной светящейся области сверху от изображения ТГК (пересвеченное пятно в центре кадра). Сигнал от включения СКД быстро теряет яркость, и время регистрации этой области не превышает ≈1–1.5 с.

Другой тип оптического сигнала, регистрируемого при проведении сеансов КЭ «Радар–Прогресс», соответствует интервалу времени после выключения СКД. После окончания работы двигателя включается режим продувки, при котором остатки несгоревшего топлива вытесняются из двигательной установки. Этот процесс сопровождается гораздо более ярким оптическим сигналом — образуется достаточно яркая «струя», вытянутая в направлении работы СКД (рис. 57).

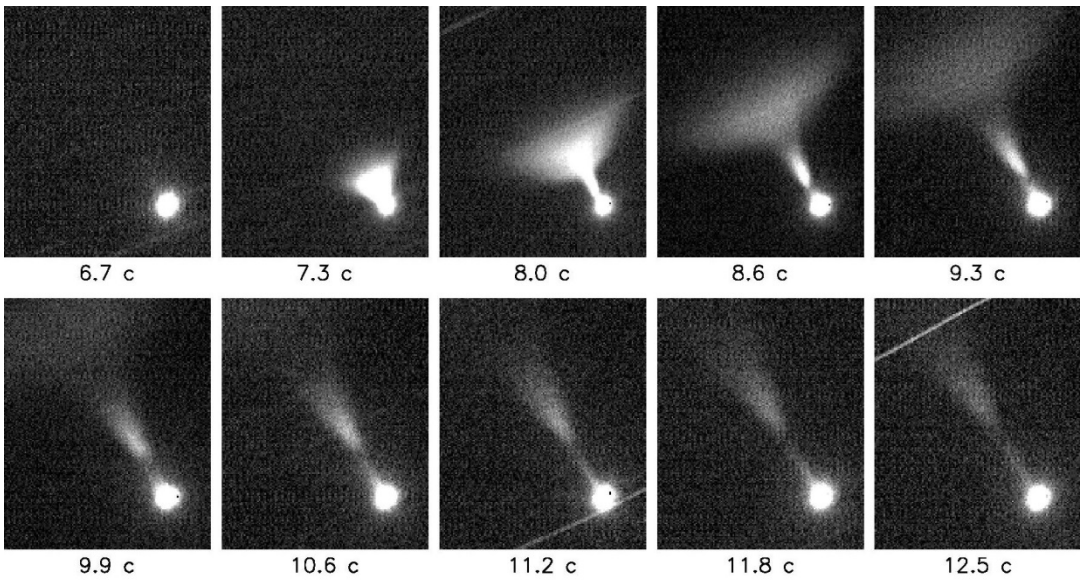


Рис. 57. Пример оптического сигнала, регистрируемого во время продувки СКД (01.09.2010). Время экспозиции 0.5 с

Разработанные методы обработки оптических изображений [12] позволили, с учетом различных условий в разных сеансах КЭ, измерить параметры струй, наблюдаемых во время работы и после выключения двигателя ТГК «Прогресс», исследовать их динамику и взаимодействие с окружающей средой.

Во время работы двигателя наблюдается слабый оптический сигнал, процесс расширения газов протекает быстро и удается зарегистрировать только первые 1–2 с после включения двигателя. Основной особенностью при работе двигателя является повышенная яркость внешней границы струи газов. Геометрия струи примерно сохраняет геометрию сопла в первые секунды работы двигателя, что позволяет оценить скорость истечения газов в 4–5 км/с.

Оптический сигнал при продувке двигателя (после его выключения) образуется за счет отражения солнечного света от более плотных частиц топлива, выбрасываемых из двигателя. Скорость выброса струи ниже, чем у струи газов при работе двигателя и не превышает ≈1 км/с. Форма струи при этом имеет две компоненты — узкую и широкую, более диффузную. Узкая компонента имеет угол 30°, соответствующий выходному углу сопла, который сохраняется со временем. Широкая компонента имеет угол ≈120°. На фоне общего расширения струи наблюдается ее слабое смещение (V≈0.2–0.3 км/с) в направлении, противоположном движению ТГК, которое можно связать с взаимодействием с окружающей средой.

2.5.4. Позиционные и фотометрические измерения астероидов, в том числе сближающихся с Землей

В 2016 г. на широкоугольном телескопе АЗТ-33ВМ проводились координатные и поисковые наблюдения астероидов. В главном фокусе телескопа была установлена ПЗС-камера FLI PL4301. Поле зрения телескопа с этой камерой составило 0.5° с масштабом 0.88 угл. сек на пиксель.

Всего были получены координатные измерения 115 объектов, для которых было надежно установлено их движение относительно звезд. 75 объектов были идентифицированы как известные астероиды, а по 40 объектам информации в базе данных Центра малых планет [13] не содержится. Четыре измеренных астероида относятся к астероидам, сближающимся с Землей: 2013VA10, 2016MO, 2003SR15 и 2013YB48.

Координатные измерения астероида 2016 MO проводились 6 июля 2016 г. во время его сближения с Землей. Абсолютная звездная величина астероида 24.909^{m}, что соответствует его диаметру — примерно 45 м. Во время наблюдений астероид находился на расстоянии от Земли 2.5 млн км, а его блеск составлял 19.8^{m}. За время экспозиции (60 с) астероид сдвигался по небу на 35 угл. сек, поэтому его изображение на камере представлялось в виде штриха (рис. 58).

Полученные кадры были обработаны программным пакетом APEX-II [14], данные измерений направлены в Центр малых планет и опубликованы в Minor Planet Circular (MPS 717397–719360).

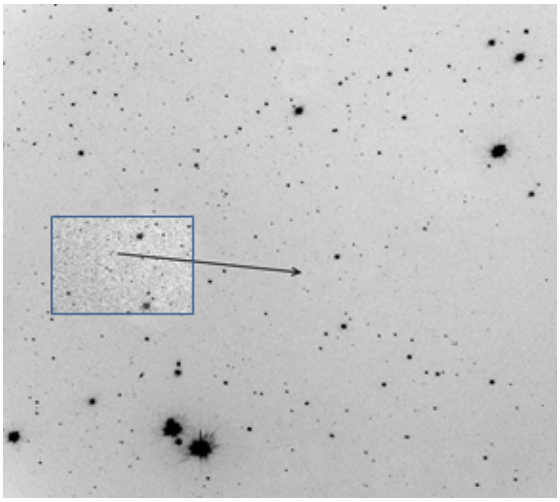


Рис. 58. Изображение астероида 2016 MO в поле зрения телескопа АЗТ-33ВМ

Остальные объекты были найдены во время обзорных наблюдений выбранных участков неба, для них были проведены координатные измерения. Обзор осуществлялся автоматически с помощью программного обеспечения, разработанного для поддержки обзорных наблюдений на телескопе АЗТ-33ВМ. Делалось восемь сдвигов телескопа на 0.5° по склонению, после чего телескоп возвращался в начальную точку, и проход повторялся (пять раз). Время экспозиции в обзоре составляло 60 с. Для каждой точки неба были получены пять кадров звездного поля с интервалом 9 мин.

Обработка кадров, полученных в ходе обзорных наблюдений, проводилась программой CoLiTec [15], предназначенной для автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров. С помощью данной программы были обнаружены подвижные относительно звезд объекты с блеском до 23 звездной величины. Пример регистрации астероида 2006 WO156 с блеском 20.9^{m} показан на рис. 59.

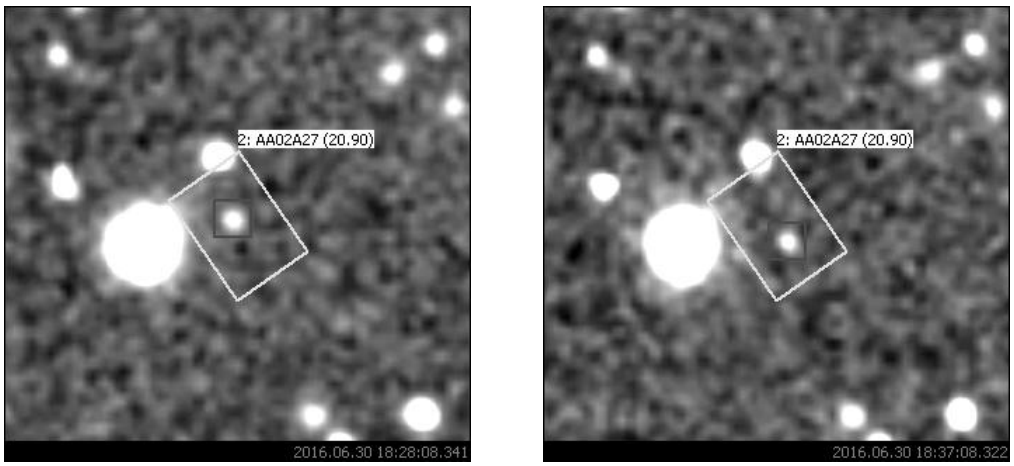


Рис. 59. Регистрация в программе CoLiTec астероида 2006 WO156, обнаруженного 30 июня 2016 г.

Для трех неизвестных астероидов были проведены специальные астрометрические измерения в течение трех ночей. Данные измерений были направлены в Центр малых планет. По результатам наблюдений эти астероиды были признаны объектами, открытыми в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН (код обсерватории С48). Им присвоены временные обозначения 2016 SX34, 2016 SZ34, 2016 SJ45.

Результаты координатных измерений астероидов, сближающихся с Землей, были опубликованы на сайте NEODyS-2 [16]. По данным этого сайта, точность измерений была лучше 0.3 угл. сек (0.9 угл. сек для 2016 MO).

Данные по всем известным и открытым астероидам опубликованы в Minor Planet Circular (MPS_20160703, MPS_20160710, MPS_20160828, MPS_20160904, MPS_20161002, MPS_20161009, MPS_20161017, MPS_20161106).

2.5.5. Отладка элементов активной оптической системы телескопа АЗТ-33ВМ

В конструкции нового широкоугольного телескопа АЗТ-33ВМ [17], введенного в эксплуатацию в конце 2015 г. в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН, применены элементы активной оптики для обеспечения требований к точности взаимного положения главного и вторичного зеркал [18]. Для этого вторичное зеркало телескопа закреплено на гексаподе, обеспечивающем его прецизионное перемещение и наклон (рис. 60). Реальное положение вторичного зеркала определяется датчиками автономной автоматической системы контроля положения, оснащенной оптическими сенсорами контроля (ОСК).

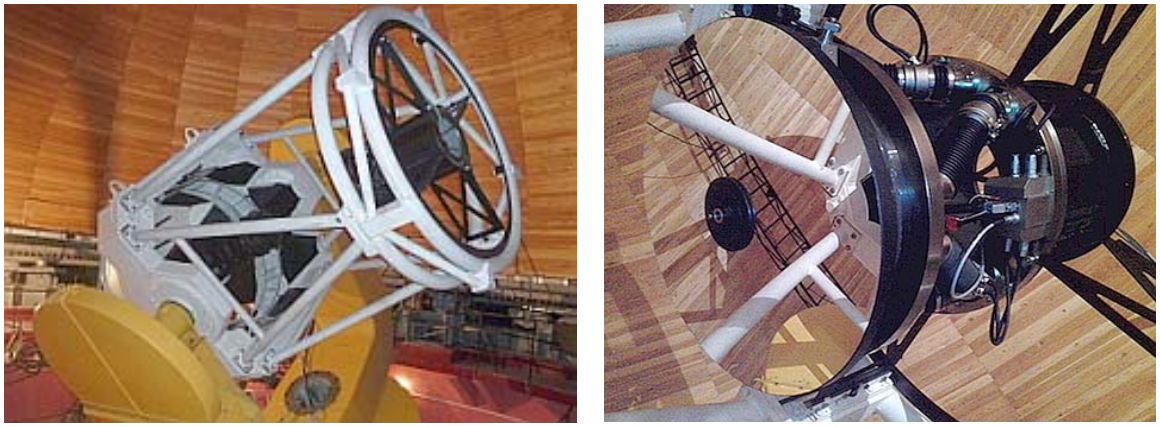


Рис. 60. Слева — телескоп АЗТ-33ВМ в башне телескопа; справа — вторичное зеркало телескопа на гексаподе

Оптические сенсоры контроля предназначены для измерений двух видов отклонений — смещения и наклона. Измерительным элементом является ПЗС-датчик, входящий в состав ОСК. Каждый измерительный канал (смещения и наклона) состоит из своего источника света, вспомогательных оптических элементов и отдельного ОСК. Метод измерения в канале состоит в следующем. С помощью источника света и вспомогательной оптики формируются два световых пучка, один из которых отражается от небольшого плоского зеркала, закрепленного на главном зеркале оптической системы, а второй — от отражающего элемента на узле вторичного зеркала (в качестве отражающего элемента используются уголковый отражатель для канала смещения и плоское зеркало для канала наклона). После отражения оба световых пучка фокусируются на ПЗС-датчике ОСК данного канала, формируя на нем две световых точки — опорную (от главного зеркала) и контрольную (от вторичного). Относительное расположение этих двух точек будет изменяться при возникновении в оптической системе отклонения, измеряемого данным каналом (смещения или наклона).

Программа «Интерфейс оператора системы активного контроля вторичного зеркала» является частью системы автоматического контроля и юстировки оптической системы те-

лескопа. Программа реализует процесс автоматической активной юстировки, включающий: прием кадров изображений от контрольных источников света из ОСК смещений и наклона; обработку кадров с целью определения векторов смещения и наклона вторичного зеркала; выдачу команд коррекции положения вторичного зеркала на исполнительное устройство (гексапод). Программа предоставляет графический интерфейс для управления процессом автоматической юстировки, а также позволяет оператору получить информацию о текущем юстировочном состоянии системы для ручного контроля над процессом юстировки и первичной настройки двухзеркальной оптической системы (рис. 61).

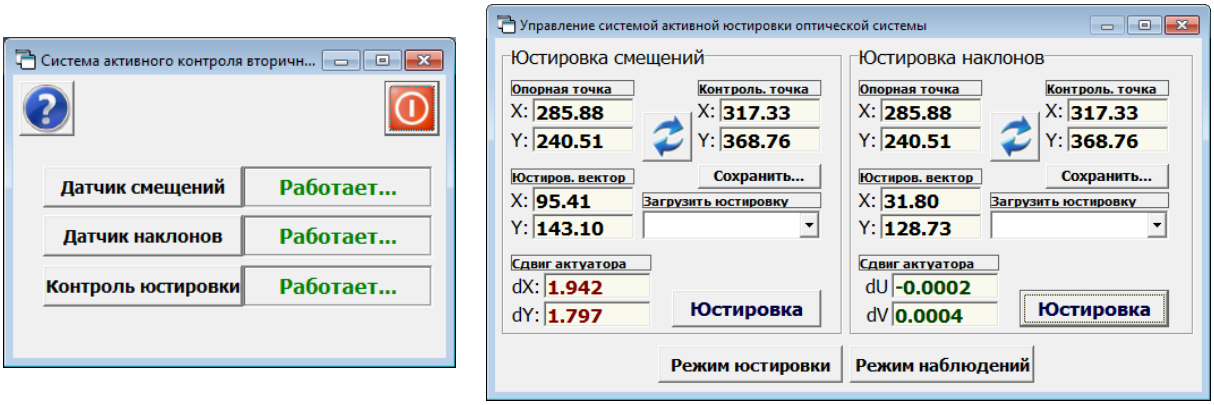


Рис. 61. Интерфейсные окна программы «Системы активного контроля вторичного зеркала»

Программа реализует следующие функции:

- настройка параметров работы камер-датчиков ОСК, таких как: время экспозиции на камере; состояние источника света (подсвечивающего светодиода); ширина и высота кадра с камеры, а также смещение кадра относительно левого нижнего угла полного кадра ПЗС-сенсора;
- управление ходом экспозиций на камерах в двух режимах: режим одиночных экспозиций с ручным запуском каждой экспозиции; режим видеотрансляции с заданным интервалом между экспозициями;
- измерение параметров юстировки оптической системы по изображениям с камер-датчиков ОСК, что включает в себя: определение положений центров опорной и контрольной точек на изображениях с камер и вычисление смещения положения вторичного зеркала оптической системы относительно главной оптической оси по четырем степеням свободы (две степени свободы на смещения и две степени свободы на наклоны);
- выдача на исполнительное устройство команд коррекции положения вторичного зеркала в автоматическом и ручном режимах с индикацией результата выполнения операции;
- поддержка двух режимов работы: в режиме юстировки программа запускает видеотрансляцию кадров с камер и включает подсвечивающие светодиоды для определения и контроля текущего состояния положения оптической системы; в режиме наблюдений подсвечивающие светодиоды выключаются для уменьшения паразитной засветки оптической системы телескопа;
- сохранение и загрузка файлов изображений с камер-датчиков ОСК;
- сохранение и загрузка юстировочных положений оптической системы;
- контроль состояния всех узлов системы с указанием возможных причин возникновения неисправностей, если один или несколько компонентов системы функционируют с ошибками;
- возможность удаленного управления и мониторинга состояния системы через протокол удаленного вызова процедур (реализуемый при помощи библиотеки ICE, разработанной компанией ZeroC) с помощью распределенной сети клиентских приложений.

Проведенные тестовые измерения позволили определить параметры системы активной юстировки. Определялись такие параметры, как чувствительность и точность измерений. Для канала измерения наклона вторичного зеркала чувствительность составила 2.9 угл. сек/пиксель, а точность измерений — 0.9 угл. сек. Для канала измерения смещения чувствительность составила 0.04 мм/пиксель, а точность измерений — 0.002 мм. Кроме того, были определены взаимные влияния наклона и смещения вторичного зеркала: для канала наклона влияние составило 0.9 угл. сек на 1 мм смещения зеркала, для канала смещения — 0.0003 мм на 1 угл. сек наклона зеркала. Параметры исполнительного механизма (гексапод M-850K086 фирмы PI) позволяют отрабатывать наклоны с шагом 2 угл. сек и смещения с шагом 0.01 мм в диапазонах ±1.8° и ±5 мм соответственно.

Публикации:

1. Коробцев И.В., Горяшин В.Е., Еселевич М.В. Результаты сопровождения космического аппарата в окрестности точки либрации L2 системы Солнце–Земля // Астрономический журнал. 2017. Т. 94, № 1 (в печати).

2. Клунко Е.В., Еселевич М.В., Тергоев В.И. Наблюдения ТГК «Прогресс» на оптическом телескопе АЗТ-33ИК // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 17–23.

3. Еселевич М.В., Хахинов В.В., Клунко Е.В. Параметры оптических сигналов на телескопе АЗТ-33ИК, зарегистрированных в активном космическом эксперименте «Радар–Прогресс» // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 24–32.

Список использованных источников:

1. Ильин И.С., Заславский Г.С., Лавренов С.М., Сазонов В.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Ярошевский В.С. Баллистическое проектирование траекторий перелета с орбиты искусственного спутника Земли на гало-орбиту в окрестности точки L2 системы Солнце–Земля // Космические исследования. 2014. Т. 52. С. 476.

2. Lindegren L., Perryman M.A.C. GAIA: Global Astrometric Interferometer for Astrophysics // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1996. V. 116. P. 579.

3. Altmann M., Bouquillon S., Taris F., Steele I.A., Smart R.L., Andrei A.H., Barache C., Carlucci T., Elsa S.G. GBOT: Ground Based Optical Tracking of the Gaia satellite // Proc. SPIE. 2014. V. 9149. 91490P.

4. HORIZONS Web-Interface. 2014. URL: http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi (дата обращения: 29.01.2014).

5. Clem J.L., Landolt A.U. Faint UBVRI standard star fields // Astron. J. 2013. V. 146, N 4. P. 88.

6. Stetson P.B. Homogeneous Photometry for Star Clusters and Resolved Galaxies. II. Photometric Standard Stars // The Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2000. V. 112, iss. 773. P. 925–931.

7. Bucciarelli B., et al. An all-sky set of (B)-V-R photometric calibrators for Schmidt surveys. GSPC2.1: First release // Astron. Astrophys. 2001. V. 368. P. 335–346.

8. Monet David G., et al. The USNO-B Catalog // Astron. J. V. 125, iss. 2. 2003. P. 984–993.

9. The USNO A2.0 photometric scale compared to the standard Landolt BVR magnitudes. URL: http://www.britastro.org/asteroids/USNO%20photometry.htm (дата обращения: 07.11.2016).

10. Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П., Алсаткин С.С., Ратовский К.Г., Кушнарев Д.С, Твердохлебова Е.М., Куршаков М.Ю., Манжелей А.И., Тимофеева Н.И. Результаты дистанционного зондирования ионосферных возмущений в активных космических экспериментах «Радар–Прогресс» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 199–206.

11. Лебедев В.П., Хахинов В.В., Габдуллин Ф.Ф., Корсун А.Г., Твердохлебова Е.М., Лалетина Е.А., Манжелей А.И. Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 50 (1). С. 51–60.

12. Еселевич М.В., Хахинов В.В., Клунко Е.В. Параметры оптических сигналов на телескопе 2. АЗТ-33ИК, зарегистрированных в активном космическом эксперименте «Радар–Прогресс» // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 24–32.

13. Minor Planet Center. 2016. URL: http://www.minorplanetcenter.net/ (дата обращения: 01.12.2016).

14. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «АПЕКС-I» и «АПЕКС-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрономический вестник. 2010. Т. 44, № 1. С. 74–87.

15. CoLiTec — Collection Light Technology. Software for automated asteroids and comets discoveries. 2016. URL: http://www.neoastrosoft.com/colitec_ru/ (дата обращения: 01.12.2016).

16. NEODyS-2, Near Earth Objects — Dynamic Site, URL: http://newton.dm.unipi.it/neodys/ (дата обращения: 01.12.2016).

17. Денисенко С.А., Камус С.Ф., Пименов Ю.Д., Тергоев В.И., Папушев П.Г. Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 10. С. 48–51.

2.6. Фундаментальные основы мониторинга и контроля околоземного космического пространства в оптическом диапазоне

2.6.1. Широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ

Работы по созданию широкоугольных оптических систем для комплексного решения задач контроля космического пространства и астероидно-кометной безопасности проводились исследовательскими организациям США, Европы и России, в том числе Российской академией наук. Проект 1.6-метрового телескопа АЗТ-33ВМ разрабатывался с 2001 г. и создан на базе новых конструкторско-технологических решений, соответствующих мировому уровню. Сборочные и пусконаладочные работы по телескопу АЗТ-33ВМ были завершены в конце 2015 г. Телескоп установлен в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН (рис. 62).

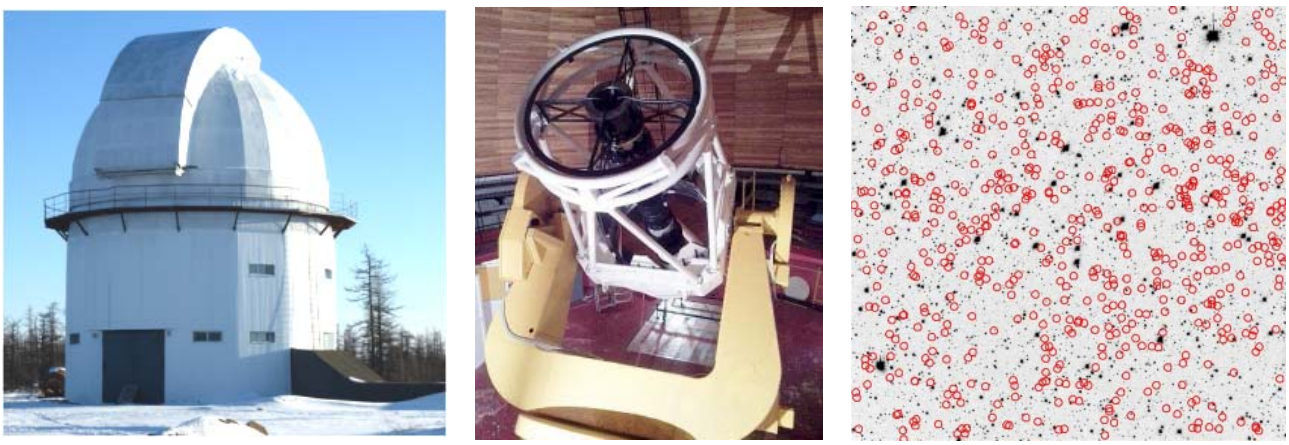


Рис. 62. Слева — купол; в центре — телескоп АЗТ-33ВМ, смонтированный внутри купола; справа — поле зрения (0.5×0.5°) телескопа АЗТ-33ВМ (на кадре отмечены звезды слабее $V=22^m$, экспозиция 60 с)

В телескопе применены светосильные оптические элементы. Оптическая схема телескопа разработана ИСЗФ СО РАН и ОАО «ЛОМО» [1]. За основу принята схема «квази-Ричи–Кретьена» с предфокальным линзовым корректором поля. Основными элементами схемы являются светосильное асферическое главное зеркало диаметром 1.6 м и небольшое по увеличению, но с большим градиентом асферичности вторичное зеркало

диаметром 0.6 м. Эквивалентное фокусное расстояние составляет 5.6 м (светосила 1:3.5). Вторичное зеркало закреплено на гексаподе, обеспечивающем его прецизионное перемещение и наклон. Реальное положение вторичного зеркала определяется датчиком автономной автоматической системы контроля положения. Главные оптические детали телескопа разработаны и изготовлены на российской производственной и сборочно-экспериментальной базе — предприятиях ОАО «ЛОМО» и ОАО «ЛЗОС». Характеристики качества изображения АЗТ-33ВМ в видимом диапазоне соответствуют типичным известным в настоящее время телескопам подобного класса. В системе управления применен высокомоментный шаговый привод в сочетании с прецизионной червячной передачей для обеспечения плавного регулирования скоростей и точности позиционирования 0.25″.

Расчетное угловое поле зрения телескопа АЗТ-33ВМ составляет 2.8°. Рабочее поле зрения телескопа определяется фотоприемным устройством и в настоящее время составляет 0.5×0.5° с ПЗС-камерой FLI PL4301, имеющей 2084×2084 пикселей размером 24 мкм. В лаборатории перспективных разработок САО РАН ведется изготовление фотоприемной камеры на основе мозаики ПЗС-сенсоров. Оборудование телескопа этой камерой обеспечит рабочее поле зрения 2.7×1.3°.

Применение телескопа позволит решать различные задачи фундаментальной и прикладной астрономии. Одним из основных направлений использования АЗТ-33ВМ станет исследование техногенного засорения ОКП. Результаты этих исследований должны в первую очередь улучшить понимание текущего состояния популяции космического мусора (КМ) на геостационарной орбите (ГСО) путем получения статистической информации о количестве объектов, их размерах и параметрах орбит.

2.6.2. Порядок проведения наблюдений

В сентябре–октябре 2016 г. на АЗТ-33ВМ были проведены сеансы обзорных наблюдений общей длительностью около 28 ночных часов, в ходе которых выполнялась также экспериментальная отработка аппаратуры, методов и специального программного обеспечения в натурных условиях.

Как и в большинстве оптических обзоров космического мусора, целью наблюдений на АЗТ-33ВМ было исследование популяции космического мусора в области геостационарной орбиты (ГСО). На наличие большого числа некаталогизированных КО с блеском до 20.5 звездной величины в области ГСО указывают отдельные экспериментальные исследования, например, выполненные на метровом телескопе Европейского космического агентства (поле зрения 0.7×0.7° с камерой 4096×4096 пикселей, масштаб пикселя 0.6″) с проницающей способностью до 21 звездной величины [2]. Аналогичные результаты были получены в обзорных наблюдениях, проведенных на 1.8-метровом телескопе Pan-STARRS Института астрономии Гавайского университета [3].

Вследствие возмущений, действующих на околоземные орбиты (аномалии в гравитационном поле Земли, гравитационное притяжение Солнца и Луны, давление солнечного излучения), область геостационарных орбит (геостационарное кольцо) может быть определена как участок сферической оболочки с центром в экваториальной плоскости, толщиной по радиусу 150 км и ограниченный по широте углом ±15° [2]. При проведении обзорных наблюдений выбирались области геостационарного кольца с относительно стабильными атмосферными условиями в ясные часы безлунных ночей. Какая-либо априорная информация по космическим объектам не использовалась.

Типичные сценарии проведения скоростного обзора неба подробно рассмотрены в [2]. Для поддержки обзорных наблюдений на АЗТ-33ВМ разработано специальное программное обеспечение в форме графического диалога «Обзорные наблюдения» (рис. 63). С помощью этого диалога, а также файла инициализации можно настроить и реализовать подходящую стратегию с учетом особенностей оборудования и решаемой задачи.

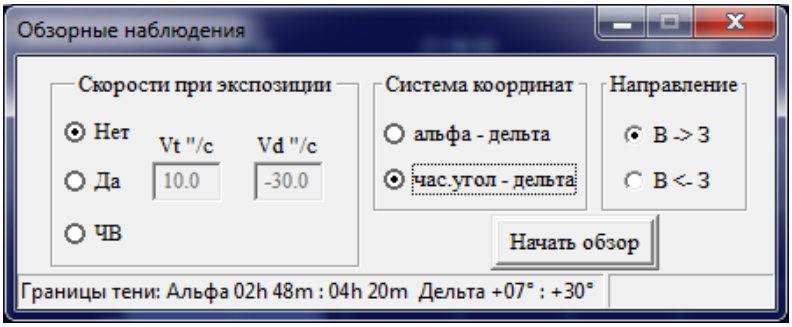


Рис. 63. Диалоговое окно для выбора сценария обзора

Сценарий обзора ГСО для АЗТ-33ВМ при рабочем поле зрения 0.5×0.5° предполагает сканирование полосы склонения размером в два поля зрения (~1°) при фиксированных часовых углах, выбираемых вблизи тени Земли. Для каждого поля в пределах полосы поочередно получали по шесть снимков. Суммарная продолжительность наблюдений каждого поля составила ~2 мин.

Характерной особенностью ПЗС-изображений полей, получаемых в обзорах ГСО, является наличие большого числа треков звезд. Видимое движение КО отличается от движения звезд, объекты обнаруживаются на изображениях либо в виде точечных источников, либо в виде треков, направление и длина которых отличаются от треков звезд (рис. 64).

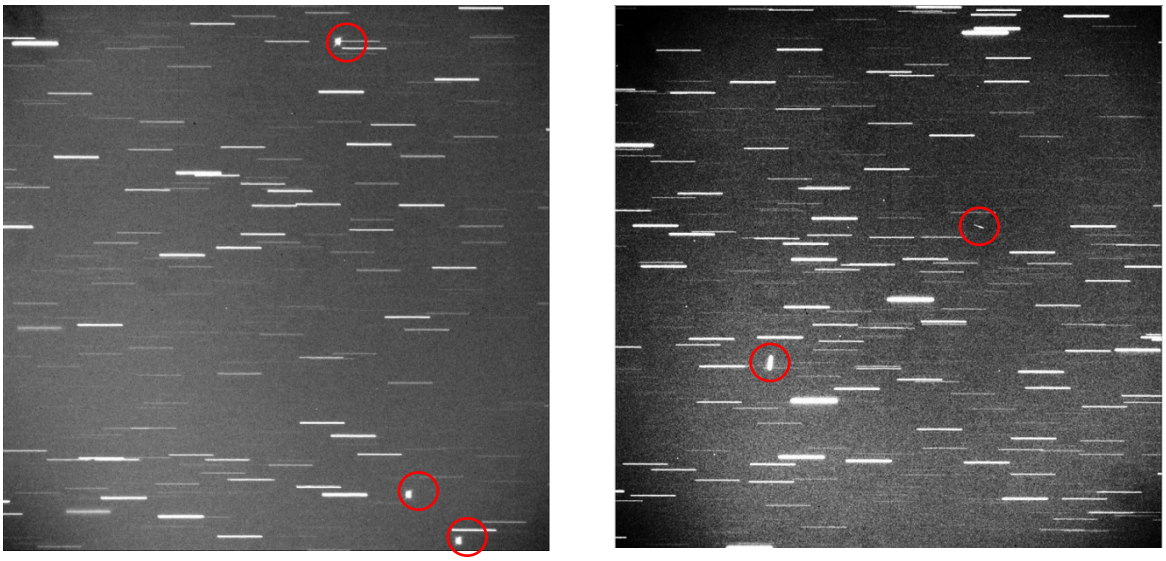


Рис. 64. Типичные изображения, получаемые при обзоре ГСО: слева — в поле три геостационарных объекта; справа — в поле два объекта КМ

Оптимальное время экспозиции при регистрации изображений 10 с выбиралось из компромисса между длиной треков звезд, маскирующих часть кадра, и величиной отношения сигнал/шум от слабых объектов, т. е. проницающей способностью для обнаружения объектов.

Очередность экспозиций звездных полей и перемещений телескопа строго синхронизирована. По окончании экспозиции телескоп перемещается одновременно с процессом считывания заряда с ПЗС-камеры и выводом наблюдаемого участка неба в окно программы управления камерой. Режимы движения телескопа при экспозиции (неподвижный, на часовом ведении, с заданными скоростями) выбираются наблюдателем в зависимости от класса наблюдаемых объектов.

Специальное программное обеспечение позволяет в реальном времени указать по-

ложение КО на последовательности получаемых изображений, что дает возможность определить приближенные координаты и скорость движения объекта. Это позволяет в течение нескольких экспозиций определить, присутствует ли обнаруженный объект в каталоге, выявить некаталогизированный объект и при необходимости обеспечить его достаточно точное сопровождение на данном участке орбиты.

Астрометрическая обработка ПЗС-кадров и идентификация наблюдаемых объектов осуществлялась после регистрации очередной полосы. Обработка полученных кадров проводилась с помощью программной платформы обработки астрономических изображений APEX II, предназначенной в основном для получения позиционных характеристик объектов — прямого восхождения и склонения на момент наблюдений. Одновременно с координатами APEX II [4] вычисляет инструментальный блеск объекта и дает оценку внеатмосферного блеска с калибровкой по звездам, попадающим в поле зрения телескопа при измерении объекта. Астрометрическая и фотометрическая редукция выполнялась с использованием наиболее полных и точных из существующих звездных каталогов UCAC3 и USNO-B1.0 соответственно.

Регистрация положения объекта по крайней мере на трех изображениях, полученных в разное время, позволяет получить предварительную орбиту объекта, но из-за короткого участка дуги орбиты не позволяет оценить все орбитальные параметры. Однако этих данных достаточно для идентификации объектов и расчета эфемериды объекта на ближайшее время, что позволяет выявлять и сопровождать в дальнейшем некаталогизированные КО.

2.6.3. Результаты обзорных наблюдений

В процессе наблюдений общей длительностью около 28 ночных часов были получены данные о 153 космических объектах, 45 из которых неизвестны или давно потеряны (рис. 65). Существенную долю наблюдавшихся космических объектов составили объекты слабее 18 звездной величины, глубина обзора составила 21.5^{m}.

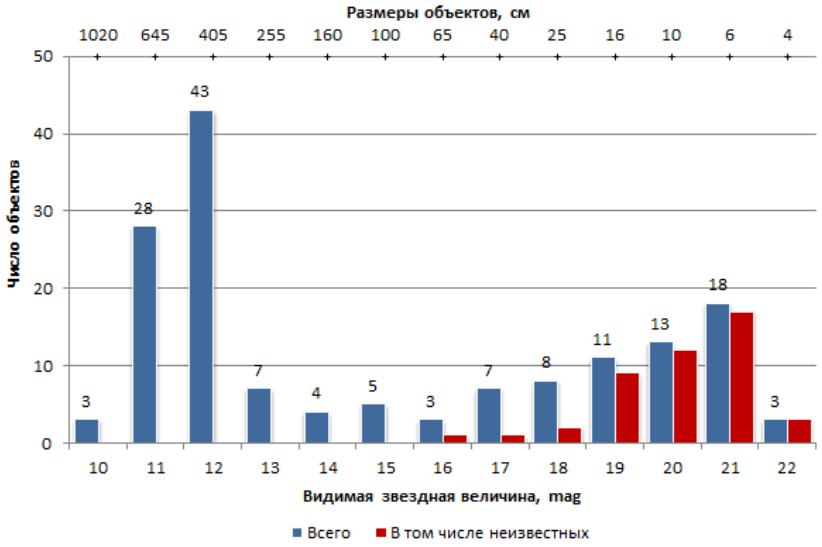


Рис. 65. Распределение объектов по блеску. На верхней оси отложен размер объектов, соответствующий диаметру сферы с диффузным отражением в области ГСО, коэффициент отражения принят 0.15

Характерной особенностью полученного распределения является минимум числа обнаруживаемых космических объектов с блеском ≈15–16 звездной величины. Если объекты левее этого минимума в основном представлены активными космическими аппаратами и крупными КО, которые не подверглись разрушениям и которые в основном каталогизированы, то объекты правее минимума относятся, по-видимому, к различным конструктивным элементам, связанным с запусками КА, и элементам разрушения КА, т. е.

малоразмерному космическому мусору. Таким образом, значительная часть малоразмерного космического мусора имеет блеск слабее 16^m и из них практически все КО слабее $\approx 18^m$ не каталогизированы. Это подтверждает актуальность проведения специальных обзорных наблюдений на телескопах с высокой проницающей способностью, что позволит в перспективе создать каталог, включающий в том числе объекты с размерами до нескольких сантиметров.

Публикации:

Еселевич М.В., Караваев Ю.С., Коробцев И.В., Тергоев В.И., Цуккер Т.Г., Широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Сборник материалов научно-практической конференции «Научное приборостроение — современное состояние и развитие». Москва. 15–16 ноября 2016 г. С. 272–274.

Список использованных источников:

1. Денисенко С.А., Камус С.Ф., Пименов Ю.Д., Тергоев В.И., Папушев П.Г. Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 10. С. 48–51.

2. Schildknecht T. Optical surveys for space debris // Astron. Astrophys. Rev. 2007. V. 14. P. 41–111.

3. Kelecy T., Jah M., Sydney P., Kervin P. Analysis of Pan-STARRS photometric and astrometric data for data association and physical consistency assessment // Proc. 6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 22–25 April 2013 (ESA SP-723, August 2013). id.28.

4. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «Апекс-I» и «Апекс-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрономический вестник. 2010. Т. 44, № 1. С. 74–87.

2.7. Диагностика межпланетной среды по данным наблюдений космических лучей

2.7.1. Жесткостной спектр и анизотропия галактических КЛ в период GLE в январе 2014 г.

6 января 2014 г. на ряде высокоширотных станциях КЛ (Баренцбург, Южный полюс, Апатиты, МакМердо) было зарегистрировано небольшое повышение интенсивности нейтронной компоненты КЛ, которое отмечено как GLE72 (Ground Level Enhancement). С начала цикла это лишь второе событие. Первое, случившееся 17 мая 2012 г. и обозначенное GLE71, тоже было довольно слабым: наибольшая амплитуда возрастания отмечена на ст. «Апатиты» и «Оулу» и составила ~18 % по пятиминутным данным. Возрастание скорости счета на нейтронных мониторах 6 января 2014 г. было весьма слабым, так, на двух высокоширотных ст. «Баренцбург» и «Южный полюс» возрастание в пятиминутных данных составило ~2–3 %, на других станциях еще меньше. Тем не менее на этих станциях возрастание интенсивности КЛ четко выделяется на фоне шума. Возрастание скорости счета нейтронных мониторов по пятиминутным данным на ст. КЛ «Баренцбург» и «Апатиты» началось в 08:15–08:20 UT [1]. На станции КЛ «Южный Полюс» по двухминутным данным начало события определено в 07:58 UT. Это событие наблюдалось на космических аппаратах, в частности, на ACE [2] при энергиях протонов менее 100 МэВ и на GOES [3] при энергиях протонов более 700 МэВ. Возрастание скорости счета в протонном канале GOES 420–510 МэВ началось в 08:12 UT. Событие GLE72 было связано со вспышкой на Солнце, которая произошла далеко за западным лимбом (W1150). Эта вспышка сопровождалась всплеском II типа в метровом радиодиапазоне (m-Type II). Начало всплеска отмечено в ~07:45 UT, а окончание — в ~08:05 UT. Вспышка на Солнце стала причиной коронального выброса массы (КВМ) в 07:30 UT, двигавшегося со скоростью 1960 км/с.

Межпланетная обстановка была спокойной, направление вектора межпланетного магнитного поля (ММП) было близко к паркеровской спирали (около 40° от Солнца), но было значительно наклонено к югу (~ –30°). Геомагнитная обстановка также была относительно спокойной. D_{st}-индекс в течение 6 января 2014 г. составлял ~ –10 нТл.

Для анализа использовались усредненные за часовые интервалы данные наземных измерений на мировой сети нейтронных мониторов (41 станция).

Методом спектрографической глобальной съемки [4, 5] получена информация о вариациях углового и энергетического распределений первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 17 апреля 2014 г. По информации, полученной по данным мировой сети станций КЛ, и данным измерения протонов на орбите Земли космическим аппаратом GOES-15 [3] рассчитаны спектры протонов КЛ в моменты исследуемого GLE. Для расчета спектров КЛ использовалось выражение, полученное в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [6].

Как сказано выше, начало всплеска II типа в метровом радиодиапазоне на Солнце 6 января 2014 г. отмечалось в ~07:45 UT, а начало повышения интенсивности КЛ на высокоширотных нейтронных мониторах регистрировалось в ~08:15–08:20 UT. На средне- и низкоширотных станциях КЛ повышения интенсивности КЛ не наблюдалось. Многими исследователями [7, 8] обсуждается вопрос о виде дифференциального спектра солнечных протонов на орбите Земли. При такой постановке вопроса при измерениях спектров частиц не понятно, каким образом можно отличить частицы, ускоренные на Солнце, от частиц галактического происхождения. В данной работе предполагается, что разность между интенсивностью протонов в разных энергетических интервалах после 09:00 UT и интенсивностью протонов соответствующих энергий в 08:00 UT является дифференциальным спектром солнечных протонов.

Расчеты показали, что ускорение протонов в период этого события произошло до жесткости частиц R~2.4 ГВ [9]. На рис. 66 представлены дифференциальные жесткостные спектры первичных КЛ в разные моменты времени в период GLE72. Видно, что эти спектры во время рассматриваемого события в диапазоне жесткостей от ~0.3 до ~2.4 ГВ не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц.

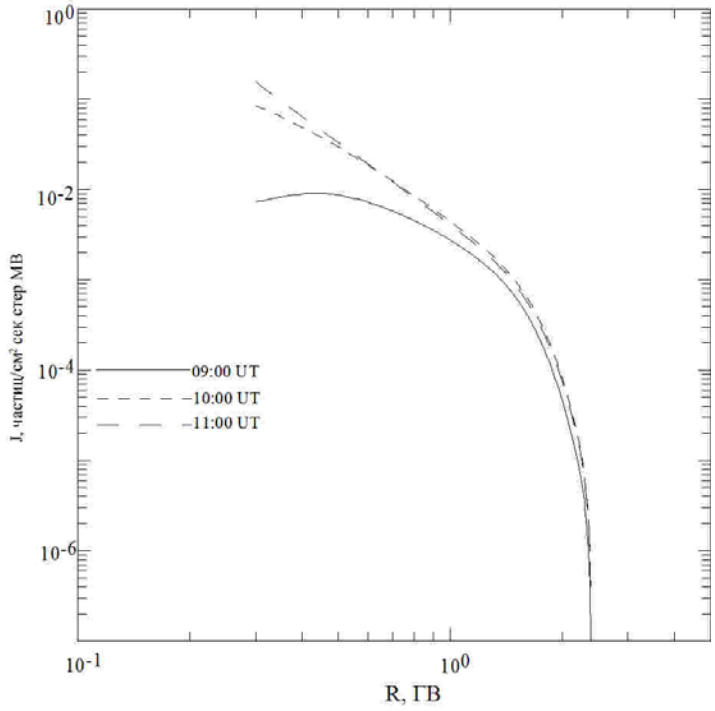


Рис. 66. Дифференциальные жесткостные спектры первичных КЛ 6 января 2014 г.

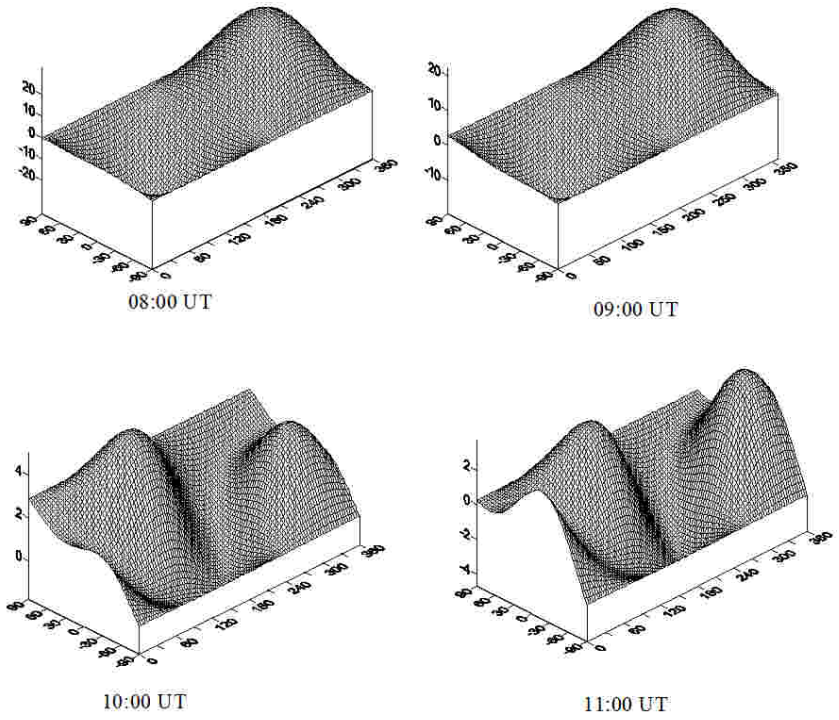


Рис. 67. Относительные изменения интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат

На рис. 67 представлены относительные изменения интенсивности КЛ 6 января 2014 г. (относительно 17 апреля 2014 г.) с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени в период GLE. По оси абсцисс отложены значения долготного угла, а по оси ординат — широтного угла.

Видна сложная динамика изменений интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ по направлениям прихода частиц. Повышенный поток частиц с жесткостью 4 ГВ в 08:00 UT и 09:00 UT идет с направлений ~270°, ~0°, т. е. присутствует ярко выраженная первая гармоника питч-угловой анизотропии с амплитудой ~25–30 %. В последующие моменты времени топология распределения интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ по направлениям прихода частиц существенно отличается от топологии в предыдущем часе. Для частиц с жесткостями 4 ГВ в 10:00 UT и 11:00 UT наблюдается двунаправленная анизотропия с повышенной интенсивностью с направлений ~130°, 40° и ~330°, ~ –15° с амплитудой ~3–5 %.

Можно сделать вывод, что в период GLE 6 января 2014 г. ускорение протонов произошло до жесткостей ~2.4 ГВ. Дифференциальный жесткостной спектр КЛ в этот период в диапазоне от 0.3 до 2.4 ГВ не описывается ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц, а распределение КЛ по направлениям прихода к Земле динамично во времени. В момент GLE Земля находилась в петлеобразной структуре ММП, что подтверждает вывод работы [3].

Публикации:

1. Li C., Miroshnichenko L.I., Sdobnov V.E. Small ground-level enhancement of 6 January 2014: Acceleration by CME-Driven Shock? // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 975–987. DOI 10.1007/s11207-016-0871-8.

2. Сдобнов В.Е. Анализ GLE 6 января 2014 г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81, № 2. С. 142–144.

2.7.2. Анализ форбуш-эффекта в июне 2015 г. методом спектрографической глобальной съемки

Возмущения СВ за счет процессов в областях хромосферных вспышек на Солнце, сопровождающиеся, в частности, КВМ, воздействуют на проникающие в гелиосферу потоки галактических КЛ и приводят к спорадическим вариациям интенсивности КЛ. К таким вариациям относятся форбуш-эффекты (изменения плотности и анизотропии КЛ в крупномасштабных возмущениях СВ [10]), которые выделяются среди других вариаций КЛ частотой появления и многообразием. Эти явления достаточно сложные, нуждающиеся в комплексном подходе при изучении, и к настоящему времени не достигнуто их полного понимания.

Исследован форбуш-эффект, наблюдавшийся 22–24 июня 2015 г. на фоне сильной геомагнитной бури.

Причиной сильных геомагнитных бурь в большинстве случаев являются упорядоченные КВМ (магнитные облака), которые характеризуются пониженными значениями характеристик СВ (температуры, скорости и плотности), а также возрастанием модуля ММП и содержат в своем теле отрицательную B_z-компоненту магнитного поля.

Во второй половине июня в одной из крупнейших в текущем солнечном цикле активной области (АО) 12 371 наблюдалась повышенная активность [11]. В частности, 21 и 22 июня 2015 г. АО произвела две вспышки, сопровождавшиеся КВМ шириной более 360^{o}, имеющими вид полного гало. Вспышка класса M2.0 (координаты N12, E13) началась в 02:06 UT, а в 02:36 UT наблюдался КВМ со скоростью около 1400 км/с. Вторая вспышка M6.5 (координаты N18, W06) началась в 17:39 UT и сопровождалась в 18:23 UT КВМ со скоростью около 1200 км/с.

Взаимодействие магнитных облаков 21 и 22 июня, когда возникшее облако распространялось по уже возмущенной среде, могло привести в совокупности к сильному возмущению межпланетной среды в окрестности Земли и, как следствие, к сильной геомагнитной буре с максимальной депрессией геомагнитного поля 23 июня 2015 г. (*Dst*-индекс составил –204 нТл).

23 июня 2015 г. мировой сетью станций нейтронных мониторах был зарегистрирован небольшой форбуш-эффект с амплитудой модуляции интенсивности нейтронной компоненты КЛ ~6–9 %.

Для анализа использовались данные мировой сети станций нейтронных мониторов (41 нейтронный монитор) [12], исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы, а также информация об электромагнитной обстановке в межпланетном пространстве в период гелиосферных и магнитосферных возмущений [11, 13, 14]. Амплитуды модуляции КЛ отсчитывались от фонового уровня 2 июня 2015 г.

Анализ выполнен с применением метода спектрографической глобальной съемки (СГС) [15], позволяющего по данным наземным наблюдений исследовать вариации жесткостного спектра и анизотропии КЛ, а также — изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений.

На рис. 68 приведены модуль ММП, B_z-компонента, скорость и температура плазмы СВ, плотность протонов, вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 и 10 ГВ, амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ, *Dst*-индекс совместно с изменениями жесткости геомагнитного обрезания в пункте наблюдения с пороговой жесткостью R=4 ГВ, полученными методом СГС. Рисунок наглядно демонстрирует, что приведенные параметры СВ (рис. 68, *а*–*д*) отреагировали на КВМ. Взаимодействие двух магнитных облаков на пути от Солнца до орбиты Земли послужило причиной увеличения модуля ММП до ~35 нТл и компоненты B_z~ –26 нТл. Скачки плотности СВ (рис. 68, *д*) в межпланетном пространстве образовались в результате того, что облако 21 июня 2015 г. догоняло облако, образовавшееся 22 июня, о чем свидетельствует корреляция температуры и плотности протонов 21–22 июня (коэффициент корреляции составил 0.69), что и привело к генерации магнитной бури.

Как следует из графиков (рис. 68, *ж*, *з*), в отдельные моменты исследуемого события

наблюдалась сильная питч-угловая анизотропия КЛ с амплитудами ~10–33 % для первой сферической гармоники (A_1). Максимальные амплитуды A_1 для частиц с жесткостью 4 ГВ наблюдались 20 июня (~10 %), 21 и 23 июня (~16 %) и 24 июня (~27 и ~33 %), а второй сферической гармоники питч-угловой анизотропии (A_2) для частиц той же жесткости — 20–23 июня (~4 %, ~5 %), 24 и 25 июня (~8 и ~6 % соответственно).

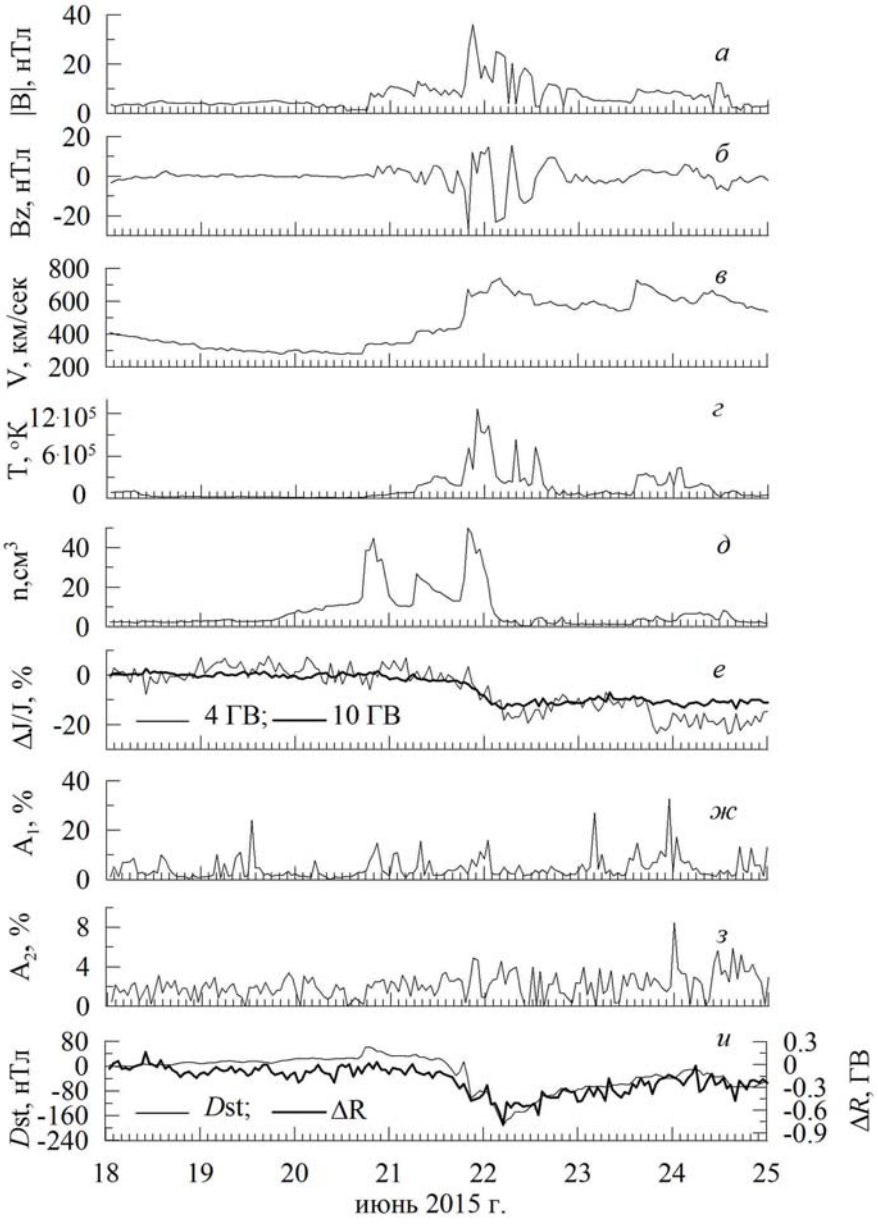


Рис. 68. Модуль ММП, B_z-компонента, скорость и температура, плотность СВ (*а–д*); *е* — вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ (тонкая кривая) и 10 ГВ (толстая кривая); *ж*, *з* — амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ; *и* — *Dst*-индекс (тонкая кривая) совместно с изменениями жесткости геомагнитного обрезания ΔR при Rc=4 ГВ (толстая кривая)

На всех фазах развития форбуш-эффекта доминировала A_1 по относительным изменениям интенсивности КЛ для частиц с жесткостями 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат. Во время максимальной модуляции КЛ и максимальной депрессии геомагнитного поля 23 июня в 05:00 UT интенсивность КЛ с направления $\psi \sim 255^{o}$, $\lambda \sim 20^{o}$ была понижена на ~24 %.

Отсутствие двунаправленной анизотропии КЛ в рамках модели модуляции КЛ регулярными полями гелиосферы может быть объяснено двумя причинами. Во-первых, эффекты потери энергии высокоэнергичных частиц, а следовательно, и понижение их интен-

сивности будут наблюдаться только в том случае, если частицы, перед тем как попасть на Землю, пересекут (за счет магнитного дрейфа) область с повышенной напряженностью магнитного поля. Таким образом, если, например, Земля попадет в область южной границы магнитной структуры с повышенной напряженностью поля, а скорость дрейфа направлена с юга на север, то эффект в КЛ высоких энергий наблюдаться не будет. Во-вторых, не будет наблюдаться эффект понижения и в том случае, если не сформируется петлеобразная структура ММП, являющаяся магнитной ловушкой.

В этом случае эффект повышения амплитуды второй гармоники будет отсутствовать, что и наблюдается в данном событии. Подобная ситуация наблюдалась в событии 20 ноября 2003 г. [6], когда в межпланетном пространстве присутствовало магнитное облако в виде сферомака [16].

Из рис. 68, *е* можно видеть, что максимальная амплитуда модуляции наблюдается для частиц с R=4 ГВ: 23 июня амплитуда вариаций составила около –19 %.

Dst-индекс хорошо коррелирует с вариациями жесткости геомагнитного обрезания (см. рис. 68, *и*), так как они отражают одно и то же явление — усиление кольцевого тока в магнитосфере. Коэффициент корреляции составил 0.91.

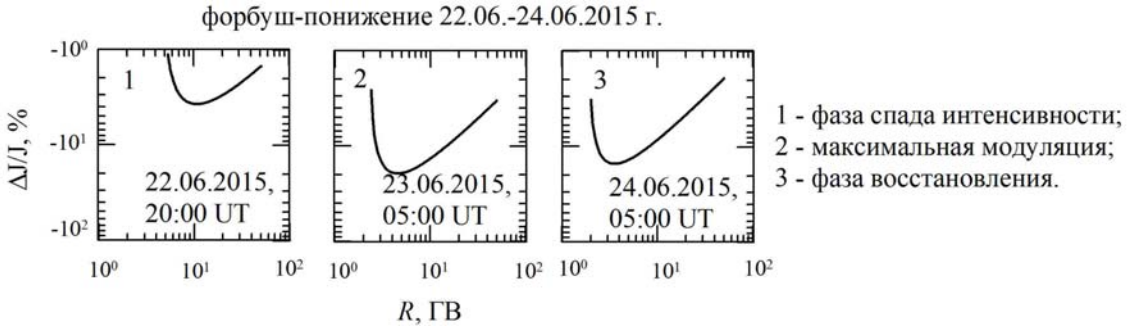


Рис. 69. Жесткостные спектры вариаций первичных КЛ на разных фазах развития форбуш-понижения

В качестве примера на рис. 69 представлены жесткостные спектры амплитуд вариаций первичных КЛ в отдельные моменты развития исследуемого форбуш-эффекта. Исследована динамика жесткостного спектра вариаций КЛ на разных фазах развития форбуш-эффекта. Изменения интенсивности КЛ во время форбуш-эффекта были разделены на три фазы: спада — интервал от начала уменьшения интенсивности КЛ до ее минимального значения; максимальной модуляции — интервал от момента минимального значения интенсивности до начала ее возрастания; восстановления — интервал, в течение которого темп счета растет до исходного уровня. Из рис. 69 видно, что жесткостные спектры амплитуд вариаций нельзя описать степенной функцией от жесткости в жесткостном диапазоне от ~2 до 50 ГВ. Аппроксимация жесткостного спектра степенной функцией от жесткости частиц возможна лишь при жесткостях выше ~10 ГВ.

В табл. 6 приведены средние значения показателя степени γ при аппроксимации жесткостных спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне от 10 до 50 ГВ на разных стадиях развития события. Видно, что на фазе максимальной модуляции показатель спектра больше, чем на фазах спада и восстановления интенсивности КЛ.

Таблица 6. Средние значения показателя γ для исследуемого форбуш-эффекта в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ

Дата события	Фаза развития форбуш-эффекта		
	Спад	Максимальная модуляция	Восстановление
22.06–24.06.2015 г.	–0.79	–0.89	–0.85

Проанализировав зависимость изменений пороговых жесткостей геомагнитного обрезания (ΔRc) от пороговых жесткостей Rc в отдельные моменты исследуемого события и результаты расчетов влияния на изменения жесткости геомагнитного обрезания тока, текущего в западном направлении по параллелям на сфере с силой, пропорциональной косинусу широты, для разных радиусов токового кольца в дипольном поле [17], мы получили, что 23 июня в 04:00–06:00 UT радиус токового кольца составил ~5 радиусов Земли.

Таким образом, проведенный анализ показал следующее:

1. В межпланетной среде наблюдалось сильное возмущение, которое образовалось в результате взаимодействия двух магнитных облаков, порожденных серией солнечных вспышек и КВМ.
2. Отсутствие двунаправленной анизотропии КЛ в рассмотренном событии свидетельствует о том, что в этот период в СВ не сформировалась петлеобразная структура ММП.
3. При аппроксимации спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в интервале 10–50 ГВ на фазе максимальной модуляции показатель спектра больше, чем на фазах спада и восстановления интенсивности КЛ.

Публикации:

Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Анализ форбуш-эффекта в июне 2015 г. методом спектрографической глобальной съемки // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81, № 2. С. 196–198.

2.7.3. Изучение последствий временного изменения тока эруптивных жгутов в крупных вспышках на Солнце

На примере данных наблюдений трех крупных солнечных вспышек, а также на основе теоретических оценок обосновано существование скин-слоя (тонкой оболочки) на поверхности выбрасываемого в ходе вспышки магнитного жгута. Для скин-слоя характерны следующие характеристики (рис. 70):

- толщина скин-слоя составляет по порядку величины ~10^6 см;
- в скин-слое возникает электрическое поле ~0.01–0.1 В/см, имеющее ненулевую составляющую вдоль осевого магнитного поля коронального жгута;
- электрическое поле, возникающее в скин-слое, может ускорять частицы до энергий ~100 МэВ/нуклон; их распространение вдоль силовых магнитных линий, сопровождаемое рассеиванием на турбулентных пульсациях, и высыпание в плотные слои атмосферы Солнца приводят к образованию эмиссионных структур овальной либо спиральной формы.

Как показали наблюдения вспышек 19 октября 2001 г. и 23 июля 2002 г., в случае приближения внешней границы кольцевых эмиссионных оснований жгута вплотную к пятну, происходят следующие процессы:

- возникает жесткое рентгеновское и гамма-излучение вспышки;
- наблюдается яркая эмиссия в хромосферных линиях и линиях ближнего ультрафиолета в местах контакта с пятном;
- появляются энергичные солнечные частицы в гелиосфере (вблизи орбиты Земли).

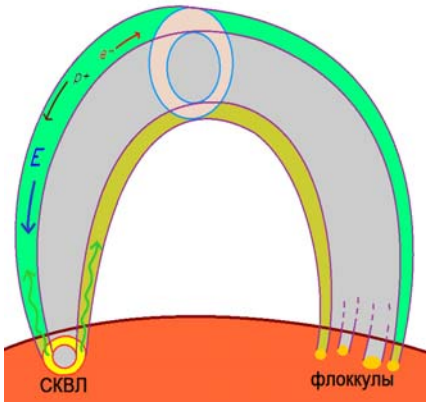


Рис. 70. Схема скин-слоя эруптивного магнитного жгута. Масштаб не соблюден. Левое основание жгута расположено вблизи пятна. Кольцо в сечении жгута — схематическое изображение скиновой оболочки. Показано электрическое поле E, а также направления ускорения в скин-слое ионов $p+$ и электронов e^- вдоль силовых линий магнитного поля. Аббревиатурой СКВЛ обозначены Hα-структуры на концах вспышечных лент

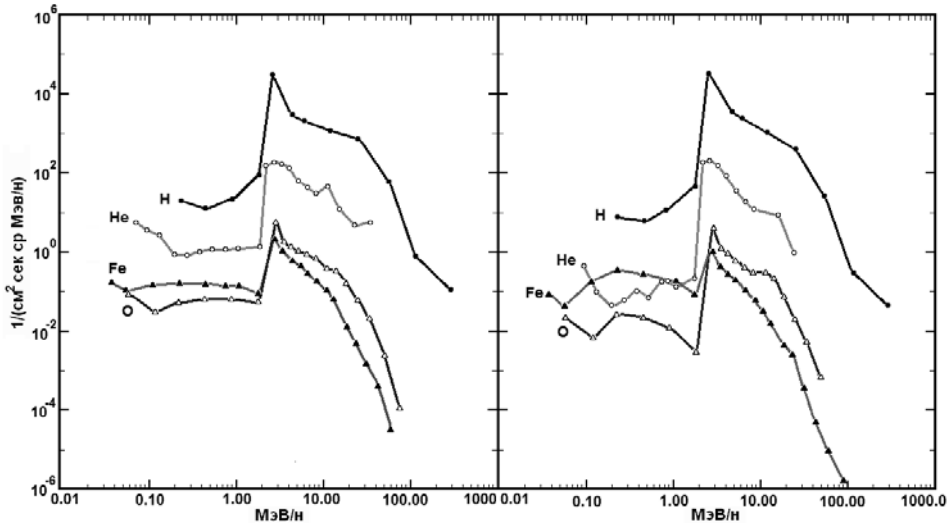
Публикации:

Kichigin G.N., Miroshnichenko L.I., Sidorov V.I., Yazev S.A. Skin-layer of the eruptive magnetic flux ropein large solar flares // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 4. P. 393–400.

2.7.4. Изучение характеристик спектров энергичных частиц от солнечных эруптивных событий (вспышек и КВМ) и проявлений FIP-эффекта в составе СКЛ по данным КА ACE и Wind

Для ряда мощных вспышечных событий (1997–2006 гг.), сопровождавшихся появлением СКЛ, на основе данных с КА ACE и Wind были построены энергетические спектры ускоренных частиц в интервалах энергий от 0.06 до 75.69 МэВ/н. Получены количественные оценки относительного содержания Fe/O в различных интервалах энергий на возмущенной стадии развития потоков СКЛ. Качественно описаны проявления FIP-эффекта в составе СКЛ в процессе их распространения.

Показано, что фронты ударных волн от КВМ оказывают существенное влияние на структуру спектров ионов в потоках ускоренных частиц в тех относительно редких случаях, когда возникают усиленные потоки протонов с энергиями >60 МэВ и интенсивностью более 10^2 (протонов/см^2 с ср), ускоренных ударными волнами. На рис. 71 приведено сопоставление энергетических спектров ионов H, He, O и Fe в периоды до (*а*) и после (*б*) прихода ударного фронта коронального выброса для события СКЛ 14–16 июля 2000 г. (по данным измерениям с КА ACE и Wind).



а *б*

Рис. 71. Энергетические спектры ионов H, He, O и Fe в периоды до (*а*) и после (*б*) прихода ударного фронта коронального выброса для события СКЛ 14–16 июля 2000 г.

Публикации:

1. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Изменение отношения Fe/O в период возмущенной стадии развития потоков СКЛ. Проявления FIP-эффекта в составе СКЛ // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 2. С. 217–227.

2. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Об особенностях изменений энергетических спектров ионов во вспышечных потоках солнечных космических лучей // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2016. Т. 112, № 1. С. 71–77.

2.7.5. Наблюдение космических лучей на станциях ИСЗФ СО РАН

На трех станциях космических лучей Саянского спектрографа, а также на ст. «Норильск» проводятся измерения интенсивности космических лучей. Данные по космическим лучам и по атмосферному давлению с минутным и часовым периодами накоплений представляются on-line на сайте 84.237.21.4 в виде графиков и текстовых файлов, хранятся на ftp-сервере и в базе данных в ИСЗФ СО РАН, обновляются в международной базе данных nmdb.eu, а также предоставляются в Мировой центр данных по солнечно-земной физике (МЦД по СЗФ).

Для обеспечения в режиме реального времени стабильной работы станций космических лучей проведены профилактические работы, произведена замена неисправного оборудования.

Публикации:

1. http://www.nmdb.eu/nest.
2. http://cgm.iszf.irk.ru.

Список использованных источников:

1. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. Анализ события GLE72 6 января 2014 г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79, № 5. С. 612.

2. http://www.srl.caltech.edu/ACE.

3. http://satdat.ngdc.noaa.gov./sem/goes/data/new_avg.

4. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. Analisis of cosmic ray pitch-angle anisotropy during the June 1972 Forbush effect by method of spectrografic global survey // Proc.18th ICRC. Bangalore, India. 1983. V. 3. P. 249.

5. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush effect on 12–15 July// Int. J. Geomagn.Aeron. 2002. V. 3, № 3. P. 217.

6. Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Диагностика электромагнитных характеристик межпланетной среды по эффектам в космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 4. С. 1–12.

7. Miroshnichenko L.I. Solar Cosmic Rays. Springer, 2001. 480 p.

8. Miroshnichenko L.I. Solar Cosmic Rays: Fundamentals and Applications 2nd edn. Springer, 2014. 521 p.

9. Li C., Miroshnichenko L.I, Sdobnov V.E. Small ground-level enhancement of 6 January 2014: Acceleration by CME-driven shock? // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 975–987. DOI: 10.1007/s11207-016-0871-8.

10. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Струминский А.Б., Янке В.Г. Чем обусловлены и с чем связаны форбуш-эффекты? // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65, № 3. С. 373–376.

11. https://www.solarmonitor.org.

12. ftp://cr0.irmiran.rssi.ru.

13. http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2015_06/univ2015_06.html.

14. http://omniweb.gsfc.nasa.gov.

15. Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Метод спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций интенсивности космических лучей межпланетного и магнитосферного происхождения // Вариации космических лучей и исследования космоса. М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 232–237.

16. Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., et al. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. IV. Unusual magnetic cloud and overall scenario // Solar Phys. 2014. V. 289, N 12. P. 4653–4673.

17. Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971. 399 с.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Научные исследования выполнялись в отделе физики околоземного космического пространства.

1. Приоритетное направление II.12. Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений.

1.1. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.12.2 «Радиофизические методы исследования верхней атмосферы и ионосферы. Распространение радиоволн» (координатор — чл.-корр. РАН А.П. Потехин).

1.1.1. Проект II.12.2.1 «Развитие новых методов экспериментальных радиофизических исследований верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. А.В. Медведев).

1.1.2. Проект II.12.2.2 «Распространение радиоволн различных диапазонов в ионосфере Земли» (руководитель проекта — чл.-корр. РАН А.П. Потехин).

1.1.3. Проект II.12.2.3 «Исследование динамических процессов в магнитосфере и высокоширотной ионосфере Земли методом обратного рассеяния радиоволн коротковолнового диапазона» (руководитель проекта — к.ф.-м.н. О.И. Бернгардт).

2. Приоритетное направление II.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.

2.1. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.1 «Фундаментальные проблемы процессов космической погоды, включая процессы на Солнце, в межпланетной среде, магнитосфере и атмосфере Земли. Контроль и экология околоземного космического пространства» (координатор — акад. Г.А. Жеребцов).

2.1.1. Проект II.16.1.1 «Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климат» (руководитель проекта — акад. Г.А. Жеребцов).

2.1.2. Проект II.16.1.2 «Изучение динамических процессов в системе нейтральная атмосфера–ионосфера–магнитосфера Земли» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. В.И. Куркин).

2.1.3. Проект II.16.1.3 «Изучение волновых процессов и возмущений в околоземном космическом пространстве» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. А.С. Леонович).

2.1.4. Проект II.16.1.4 «Исследование и мониторинг магнитосферно-ионосферных возмущений с использованием пространственно-разнесенных геофизических комплексов» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. Р.А. Рахматулин).

3. Программа Президиума РАН № 15 «Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики» (координатор — акад. Н.П. Лаверов).

3.1. Проект «Исследование системы литосфера–атмосфера–ионосфера в экстремальных условиях» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. Н.П. Перевалова).

4. Программа Президиума РАН № 31 «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности. Фундаментальные исследования процессов горения и взрыва. Актуальные проблемы робототехники» (координаторы — акад. Ю.М. Михайлов, акад. В.А. Левин, акад. Ф.Л. Черноусько).

4.1. Проект «Создание сегмента мониторинга уровня ионосферных помех в Азиатском регионе России, связанных с естественными неоднородностями полярной ионосферы» (руководитель проекта — чл.-корр. РАН А.П. Потехин).

Велись работы по гранту РНФ № 14-37-00027 «Разработка научно-технических основ мониторинга атмосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия в Арктической зоне с территории Российской Федерации» (научный руководитель — д.ф.-м.н. В.И. Куркин.

Выполнялись работы по гранту Президента поддержки ведущих научных школ НШ-6894.2016.5 «Экспериментальное и теоретическое исследование взаимосвязи динамических процессов в нижней и верхней атмосфере Земли» (научный руководитель — акад. Г.А. Жеребцов).

Выполнялось 22 гранта РФФИ:

1. 14-05-00080-а «Теоретическое и численное исследование развития локализованных возмущений в устойчиво стратифицированных течениях без точек перегиба на профиле скорости» (научный руководитель — д.ф.-м.н. С.М. Чурилов);

2. 14-05-00578-а «Анализ реакции ионосферы на возмущения нейтральной атмосферы и магнитосферы на основе модели ГСМ ТИП и комплекса радиофизических инструментов ИСЗФ СО РАН» (научный руководитель — к.ф.-м.н. К.Г. Ратовский);

3. 14-05-92002-М_2013 «Исследование динамики среднеширотной ионосферы на основе радиозатменных измерений COSMIC/FORMOSAT-3, данных радара некогерентного рассеяния, ионозондов и магнитных измерений» (научный руководитель — к.ф.-м.н. К.Г. Ратовский);

4. 14-05-00259-а «Экспериментальное исследование возмущений в ионосфере над Азиатским регионом России» (научный руководитель — д.ф.-м.н. В.И. Куркин);

5. 14-05-00588-а «Исследование взаимодействия между магнитосферой, ионосферой и атмосферой с помощью СуперДАРН» (научный руководитель — к.ф.-м.н. П.Н. Магер);

6. 14-45-04088-р_сибирь_а «Исследование пространственно-временной структуры неоднородностей электромагнитного поля Байкальской рифтовой зоны» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Р.А. Рахматулин);

7. 15-05-05387-а «Развитие методов обработки данных Иркутского радара некогерентного рассеяния для исследования среднеширотной внешней ионосферы» (научный руководитель — акад. Г.А. Жеребцов);

8. 15-05-02313-а «Экспериментальное исследование условий распространения внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере Земли по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния» (научный руководитель — д.ф.-м.н. А.В. Медведев);

9. 15-05-05561-а «Модель магнитосферных суббурь с новыми данными техники инверсии магнитограмм» (научный руководитель — д.ф.-м.н. В.В. Мишин);

10. 15-05-05227-а «Исследование механизмов генерации волновых возмущений в средней атмосфере и эффектов этих волн в ионосфере» (научный руководитель — к.ф.-м.н. М.А. Черниговская);

11. 15-05-03946-а «Исследование статистических и динамических характеристик мелкомасштабных неоднородностей ионосферы по данным экспериментального комплекса ИСЗФ СО РАН» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Ю.В. Ясюкевич);

12. 16-35-60018-мол-а-дк «Исследование комплексной структуры отклика ионосферы на события внезапных стратосферных потеплений в среднеширотном и арктическом регионах на основе данных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС» (научный руководитель — к.ф.-м.н. А.С. Полякова);

13. 16-32-00788-мол-а «Изучение эффекта Доплера в слабостационарном радиоканале Земля–ионосфера с помощью метода нормальных волн» (научный руководитель — М.С. Пензин);

14. 16-35-00027-мол-а «Исследование отклика ионосферы на одновременное воздействие различных источников в нейтральной атмосфере» (научный руководитель — к.ф.-м.н. А.С. Полякова);

15. 16-32-00051-мол-а «Методика определения ионосферных параметров по данным одиночных станций ГЛОНАСС/GPS» (научный руководитель — А.А. Мыльникова);

16. 16-55-53003-ГФЕН-а «Особенности реакции ионосферы восточно-азиатского региона на геомагнитные возмущения» (научный руководитель — акад. Г.А. Жеребцов);

17. 16-05-00254-а «Генерация азимутально-мелкомасштабных УНЧ-волн в земной магнитосфере высокоэнергичными частицами космической плазмы» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Д.Ю. Климушкин);

18. 16-05-00563-а «Исследование физических процессов формирования среднеширотных сияний в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях» (научный руководитель — д.ф.-м.н. А.В. Тащилин);

19. 16-05-00631-а «Влияние мелкомасштабной турбулентности солнечного ветра на состояние и волновую активность магнитосферно-ионосферной системы» (научный руководитель — д.ф.-м.н. А.С. Потапов);

20. 16-05-01006-а «Исследование тонкой структуры коротковолнового рассеянного сигнала по данным когерентного декаметрового радара» (научный руководитель — к.ф.-м.н. О.И. Бернгардт);

21. 16-35-50021-мол-нр «Исследование ионосферы с использованием данных глобальных и региональных спутниковых систем» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Н.П. Перевалова);

22. РФФИ 16-05-01087-а «Исследование структуры и динамики зимней полярной стратосферы и связь ее циркуляции с гравитационными приливами» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Б.Г. Шпынев);

Выполнялись работы:

- работы по укрупненному инвестиционному проекту «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» (научный руководитель — акад. Г.А. Жеребцов);
- прикладные работы в рамках хозяйственных договоров.

3.1. Развитие новых методов экспериментальных радиофизических исследований верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства

3.1.1. Экспериментальное исследование проявления внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере Земли

С использованием представительной статистики трехмерных характеристик распространения внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере (ВГВ), полученной на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР), показано, что наблюдаемая анизотропия направлений распространения ВГВ в каждый момент времени может быть объяснена интегральным действием нейтрального ветра в толще атмосферы на пути распространения волн.

Вероятность наблюдения увеличивается для ВГВ, распространяющихся в направлении, противоположном действующему на высоте наблюдения нейтральному ветру. Напротив, в направлении, совпадающем с сильным нейтральным ветром (более 50 м/с) на любой из высот, через которые ВГВ прошли, прежде чем достигнуть высоты наблюдения, распространение ВГВ блокируется.

Установлено также, что характер анизотропии наблюдаемых в верхней атмосфере ВГВ меняется в зависимости от пути распространения волн. Особенности распределения вероятности наблюдения ВГВ по направлениям для волн с различными углами наклона волнового фронта также хорошо объясняются действием нейтрального ветра.

В цикле работ, проведенных ранее на ИРНР [1–3], по изучению волновой активности в верхней атмосфере разработаны методы автоматического выделения среди наблюдаемых перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) тех возмущений, которые соответствуют ВГВ. Долговременные наблюдения на ИРНР с 2007 по 2016 г. позволили собрать уникальные данные о трехмерной пространственно-временной структуре ВГВ с периодами от 40 мин до 6 ч, включая полный вектор скорости их перемещения. На основе

анализа этой представительной статистики была исследована природа существующей выраженной анизотропии наблюдаемых ионосферных возмущений по направлениям их распространения.

Среди возможных причин неоднородности вероятности наблюдения ПИВ в зависимости от азимута их распространения исследователи выделяют три основных:

- анизотропия источников;
- влияние магнитного поля на условия распространения ионосферных возмущений;
- влияние нейтрального ветра на условия распространения ВГВ.

На рис. 72 показано распределение числа ВГВ, наблюдаемых на ИРНР, и средняя горизонтальная скорость их распространения в зависимости от азимута.

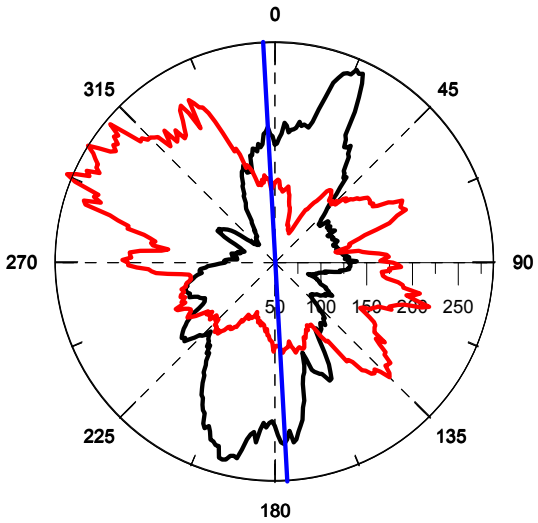


Рис. 72. Распределения ВГВ по азимутам распространения: черная кривая — относительная частота наблюдения ВГВ; красная — средняя скорость наблюдаемых ВГВ, на шкале показаны ее значения в м/сек; синяя линия — направление геомагнитного поля над ИРНР

Как можно видеть, максимумы распределения не соответствуют направлению вдоль геомагнитного поля и, кроме того, главная ось распределения характерных скоростей распространения возмущений перпендикулярна оси числа наблюдаемых ВГВ. Такое соотношение возможно в том случае, если распределение азимутов ВГВ определяется нейтральным ветром.

Нейтральный ветер понижает амплитуду ВГВ, распространяющихся по ветру, и повышает амплитуду ВГВ, распространяющихся в противоположном направлении [4]. Одновременно в соответствии с выражением $V_{\text{набл}}=V+U$ меняется и горизонтальная скорость ВГВ, наблюдаемая наземным способом. Таким образом, соотношения, приведенные на рис. 72, указывают на то, что основную причину наблюдаемой анизотропии следует искать в явлениях взаимодействия ВГВ с нейтральным ветром.

На рис. 73 цветом показано распределение ВГВ по времени и азимутам. Белыми изолиниями показаны контуры благоприятного ветра по данным модели HWM2007. Благоприятный ветер определим как распределение отрицательных проекций нейтрального ветра:

$$V_{\text{P}}(\text{LT},\varphi)=\left|V(\text{t})\right|\cos(\varphi-\varphi_{W}(\text{LT})), \qquad (3)$$

где $|V|$ — модуль скорости нейтрального ветра на высоте наблюдения, φ — азимут распространения ВГВ, φ_{W} — азимут нейтрального ветра на высоте наблюдения. Можно видеть, что максимумы в распределении азимутов ВГВ совпадают с направлениями, противоположными наиболее сильным и часто встречающимся в это время ветрам. Однако наблюдения показывают, что от 20 до 2 ч местного времени около азимута 300° отсутствует значимое число возмущений, хотя картина ветров на высоте наблюдения благоприятствует их распространению.

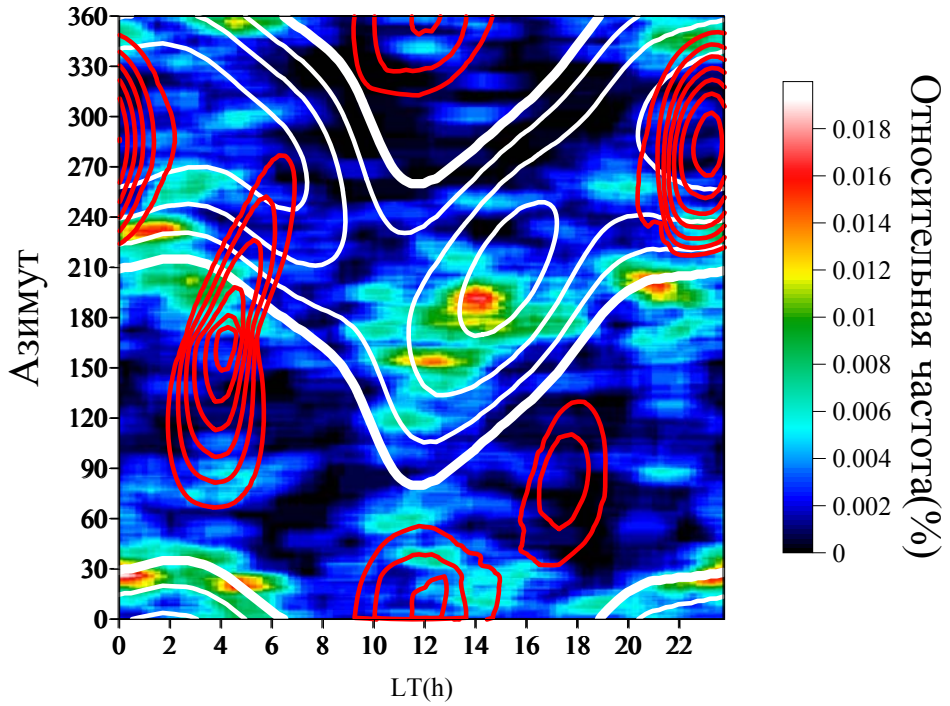


Рис. 73. Распределение ВГВ по времени и азимутам: белые изолинии — контуры разрешающего ветра; красные изолинии — контуры запрещающего ветра

Этот факт может быть связан с тем, что на условия распространения ВГВ влияет не только ветер на высоте наблюдения, но и ветер на высотах, через которые волны прошли прежде, чем достигнуть этой высоты. Сильные ветра на высотах, через которые ВГВ прошли, могут препятствовать распространению волн. Наиболее сильное влияние оказывают ветра на высотах от 90 до 200 км, где их направление резко меняется с высотой, вплоть до изменения его на противоположное. Определим запрещающий ветер как сумму положительных проекций нейтрального ветра, больших 50 м/с, на высотах 90–200 км:

$$V_{\Sigma P}(LT, \varphi) = \sum_{h=90\,км}^{200\,км} \left|V(LT, h)\right| \cos(\varphi - \varphi_W(LT, h)). \quad (4)$$

Как можно видеть из рис. 73, комбинация благоприятного и запрещающего ветров хорошо описывает распределения азимутов ПИВ по времени.

Дополнительное подтверждение этих выводов можно получить, изучив различие в характере анизотропии для ВГВ, которые имеют разные пути распространения в верхней атмосфере. Большая часть ВГВ (более 80 %) имеет фазовую скорость, направленную сверху вниз (отрицательный угол наклона волнового фронта), что соответствует ВГВ, распространяющейся от источника, лежащего ниже рассматриваемой области. Возмущения с положительными углами наклона волнового фронта составляют до 17 % от всех наблюдений и могут быть условно разделены на два диапазона: 0–45° (отражения ВГВ от областей резкого изменения ветра, расположенных выше точки наблюдения ~9 %) и 45–90° (ВГВ от источников выше рассматриваемой области ~8 %). Распределение азимутов для отраженных волн должно повторять распределение азимутов ВГВ с отрицательными углами наклона волнового фронта, но быть более узконаправленным, так как данные ВГВ прошли двойную фильтрацию нейтральным ветром. Распределение азимутов для ВГВ от источников выше рассматриваемой области должно определяться ветрами выше точки наблюдения и может отличаться от распределения азимутов волн с отрицательными углами наклона волнового фронта.

Рис. 74. Распределение азимутов ПИВ — черные линии; заштрихованные сектора — запрещенные ветром области распространения

Как можно видеть из рис. 74, распределение азимутов ВГВ в зависимости от их пути в верхней атмосфере подтверждает выводы об определяющем значении нейтрального ветра в объяснении причин наблюдаемой анизотропии направлений распространения ВГВ в верхней атмосфере.

Публикации:

Medvedev A.V., Tolstikov M.V., Ratovsky K.G., Alsatkin S.S., Kushnarev D.S. Case studies of IGW-wind interaction in upper atmosphere // Proceedings of V International conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”. Kaliningrad, 2016. P. 141–147. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

3.1.2. Исследование суточно-сезонных зависимостей поведения электронной концентрации по данным Иркутского радара НР

На основе длительных непрерывных измерений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния получены усредненные высотно-суточные вариации электронной концентрации для четырех сезонов (зима, весна, лето, осень) для двух уровней солнечной активности (низкая и умеренная). Полученные на радаре вариации были сопоставлены с физической моделью ионосферы GSM TIP и Международной справочной моделью ионосферы IRI (рис. 75, 76). Сравнение дало следующие результаты. Обе модели адекватно описывают суточные вариации на высотах ~230 км и ниже, а также высотно-суточные вариации в целом для летнего периода, включая эффект среднеширотной летней вечерней аномалии. Ни одна из моделей детально не воспроизводит такие эффекты, как близость дневных и ночных значений электронной концентрации в зимнее время на высотах ~350 км и выше при низкой солнечной активности и многопиковая структура суточных вариаций электронной концентрации в периоды равноденствий на высотах ~300 км и выше при низкой солнечной активности. При этом модель GSM TIP лучше согласуется с данными радара, чем модель IRI.

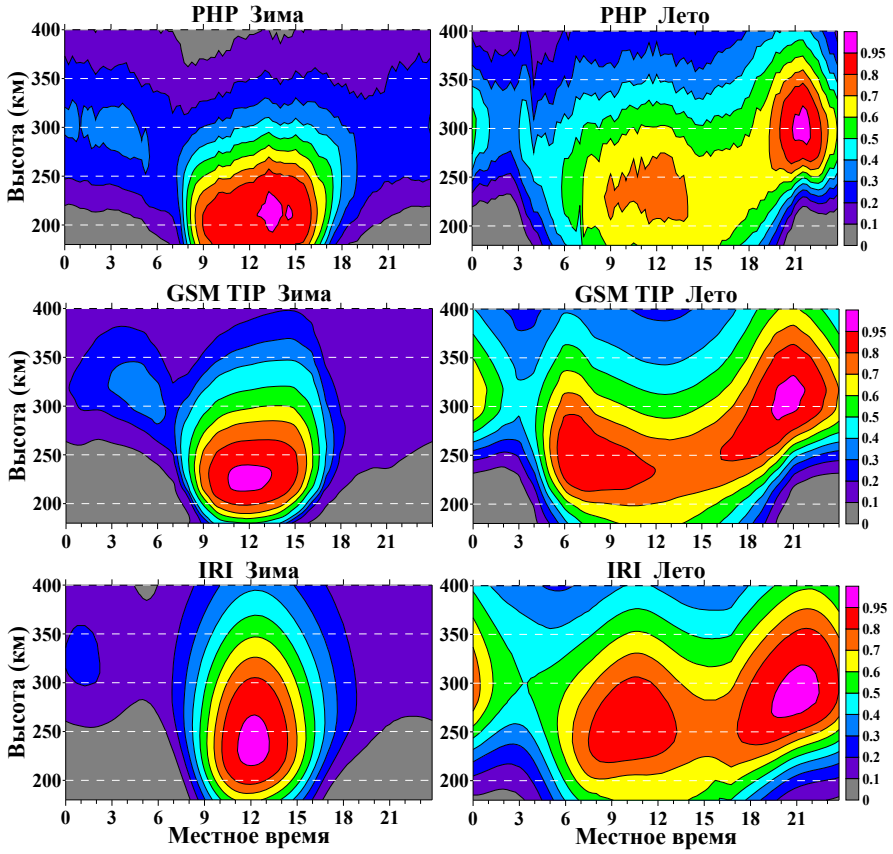


Рис. 75. Нормированные высотно-суточные вариации электронной концентрации для зимы и лета при низкой солнечной активности, полученные на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (PHP) и рассчитанные по моделям GSM TIP и IRI

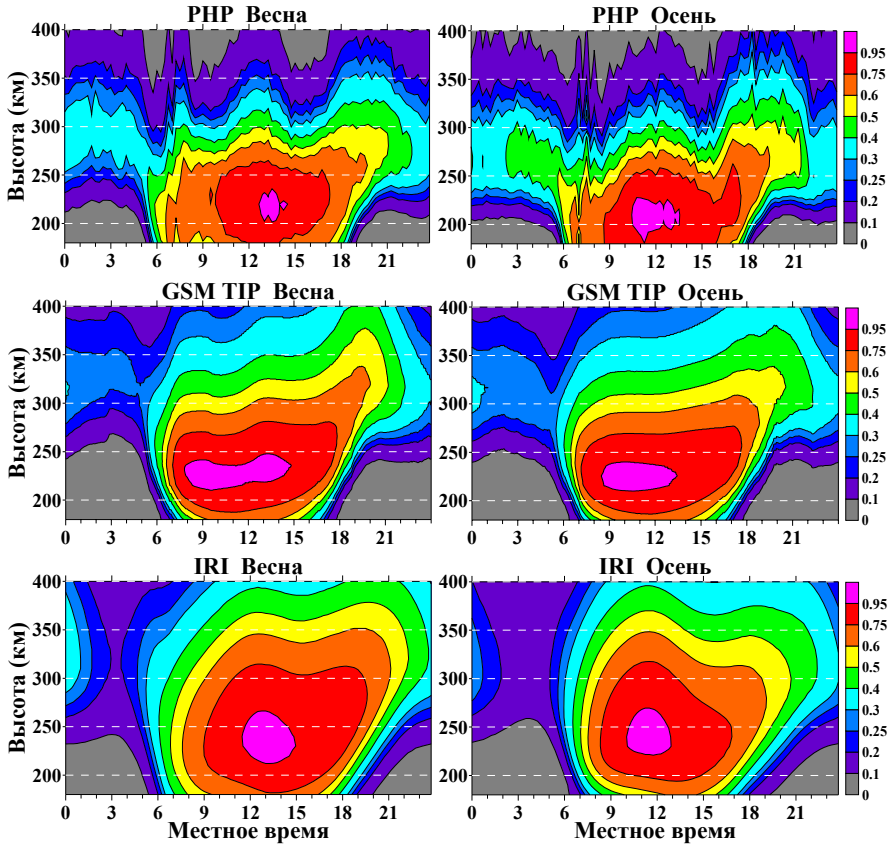


Рис. 76. То же, что на рис. 75, но для весны и осени

Публикации:

Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V. Comparison of height-diurnal electron density variations between Irkutsk Incoherent Scatter Radar and GSM TIP and IRI models // Proceedings of the V International conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety” (AIS-2016). Kaliningrad, 2016. P. 482–486. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

3.1.3. Исследование влияния геомагнитного поля на характеристики ионосферных мерцаний по данным Иркутского радара НР

Показано влияние геомагнитного поля на характеристики ионосферных мерцаний радиосигнала дискретного радиоисточника Лебедь-А, регистрируемого на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР). Наблюдения проводились в период с 18 июня по 1 июля 2015 г., при этом для регистрации сигнала использовался широкополосный приемник, за счет чего значительно улучшилось временное разрешение. Обработка регистрируемого сигнала заключалась в устранении низкочастотной составляющей, обусловленной диаграммой направленности ИРНР, построении динамического спектра с окном 20 мин и сопоставлении с динамическим спектром угла между геомагнитным полем (IGRF) и направлением на радиоисточник. Было обнаружено, что интенсивность мерцаний возрастает при приближении источника к магнитному зениту, т. е. при уменьшении угла между лучом зрения и вектором магнитного поля. По-видимому, это связано с уширением спектра мерцаний в магнитном зените (рис. 77). Заметное увеличение мощности в спектре, наблюдаемое с 19:00 до 22:00, связано с геомагнитной бурей 22 июня 2015 г.

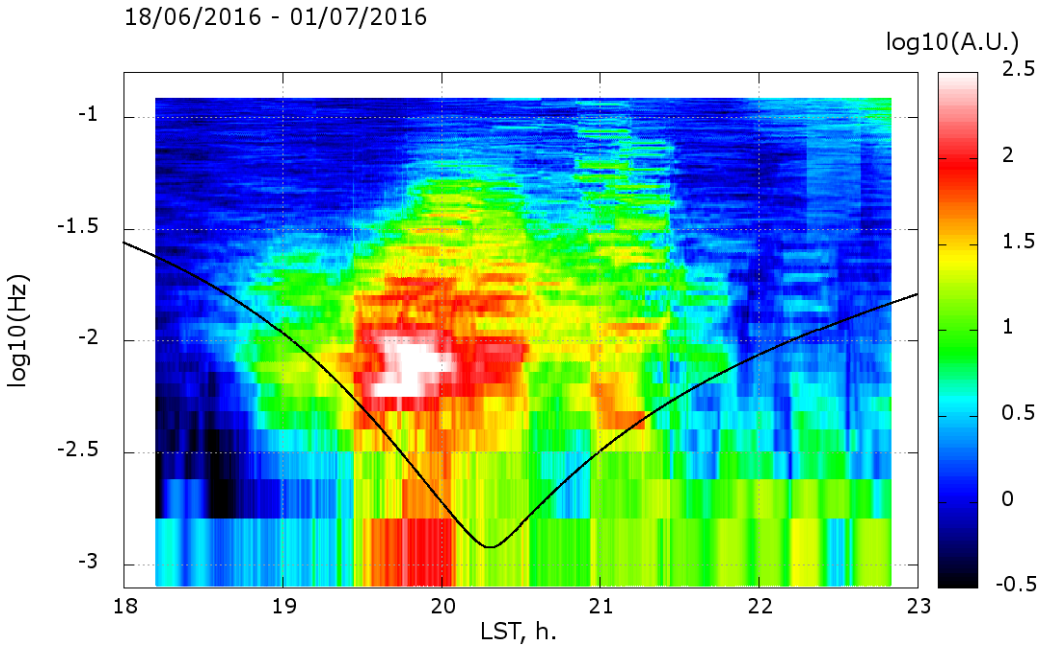


Рис. 77. Усредненный динамический спектр мерцаний за все дни наблюдений; черная линия — угол между лучом зрения на источник и вектором магнитного поля

Анализ динамического спектра мерцаний позволяет также оценить скорость перемещения неоднородностей по одновременным наблюдениям, проводившимся на ИРНР и иркутском ионозонде DPS-4. Оценки, сделанные в предположении, что движущиеся неоднородности расположены на высоте максимума электронной концентрации ионосферы, дают скорость около 10 м/с и ее направление с востока на запад.

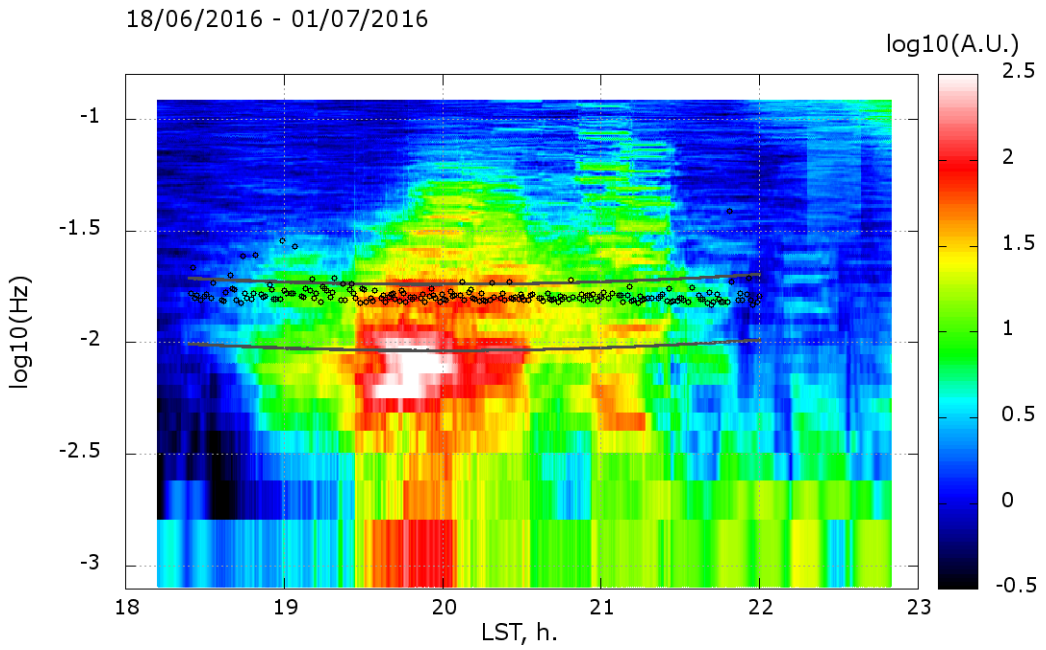


Рис. 78. Суммарный динамический спектр мерцаний за все дни наблюдений: серые линии — часоты, соответствующие выражению (1) для высот 400 км (верхняя) и 100 км (нижняя); черные точки — частоты, соответствующие высота максимума электронной концентрации по данным ИРНР и ионозонда

Публикации:

1. Глоба М.В., Васильев Р.В., Кушнарев Д.С., Медведев А.В. Интерферометрические наблюдения мерцаний дискретного радиоисточника Лебедь-А на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 24–31. DOI: 10.12737/ 13528.

2. Vasilyev R.V., Globa M.V., Kushnarev D.S., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Discrete radio source scintillations as method for ionosphere study at Irkutsk Incoherent Scattering Radar // Proceedings of V international conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”. Kaliningrad, 2016. P. 217–221. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

3.1.4. Модель кросскорреляционных характеристик при наблюдении дискретных радиоисточников на Иркутском радаре НР

Описана модель, позволяющая сопоставлять координатные характеристики дискретных космических радиоисточников (ДКР) с измеряемыми на Иркутском радаре некогерентного рассеяния характеристиками радиосигнала. Измеряемыми характеристиками являются спектральная мощность и разность фаз кросскорреляционной функции сигналов от независимых каналов регистрирующей системы. Модель основана на системе фазовых центров и позволяет с достаточно хорошей точностью получить, исходя из текущего времени и координат, центральную частоту гетеродина для организации процедуры гидирования ДКР. Работоспособность модели была протестирована на наборе данных наблюдений радара.

С результатами натурных наблюдений (рис. 79) можно сопоставить поведение модельной кросскорреляционной функции (рис. 80). Для сравнения был выбран интервал времени, когда через сектор обзора ИРНР одновременно проходят Солнце и Крабовидная туманность. Частотная зависимость модельной кросскорреляционной функции достаточно хорошо отражает наблюдаемую картину, но абсолютные значения фазы и амплитуды разнятся довольно сильно. Это происходит вследствие того, что в модель не заложен собственный шум регистрирующей системы и отсутствует калибровка разности фаз в приведенных экспериментальных данных. Кроме того, ДН фазового центра в модели является

изотропной, с линейным поведением фазы, что, конечно же, не так. В действительности, в особенности на краях ДН, фазочастотная характеристика антенны ИРНР имеет существенно нелинейный характер.

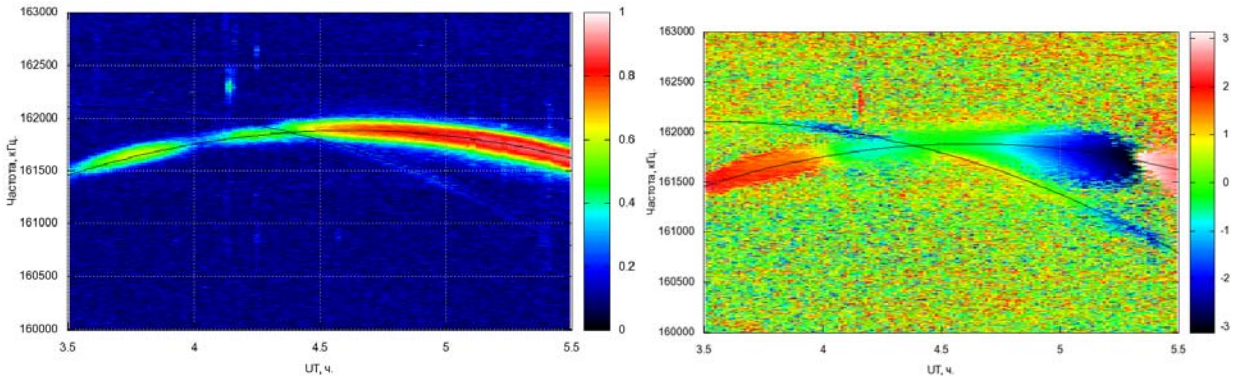


Рис. 79. Нормированная кросскорреляционная функция сигналов различных регистрируемых каналов ИРНР (слева — модуль, справа — фаза), полученная на основе натурных измерений во время нахождения Солнца и Крабовидной туманности в секторе обзора ИРНР. Черными линиями показаны модельные траектории Солнца и Крабовидной туманности

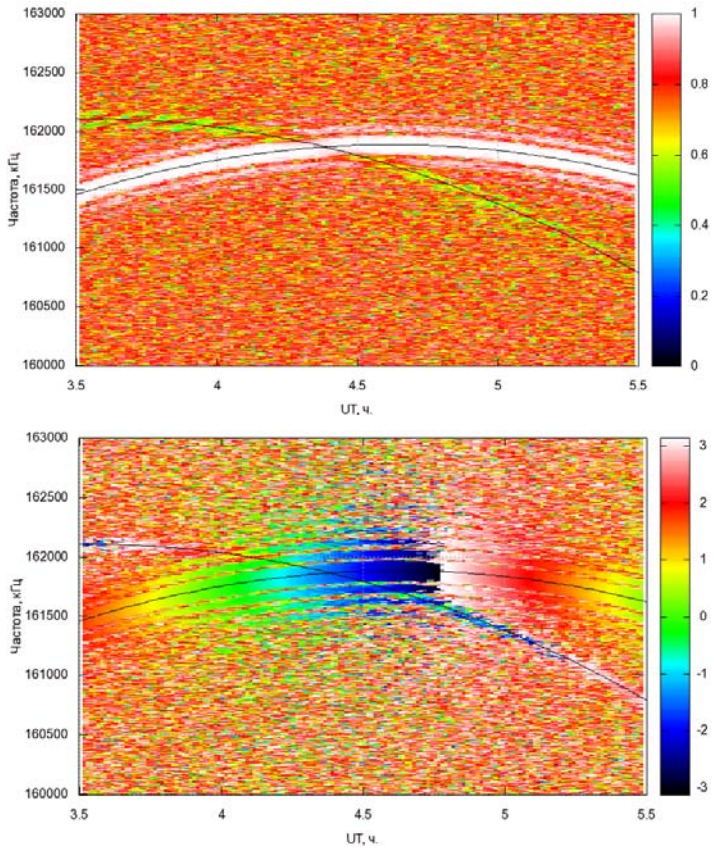


Рис. 80. Нормированная кросскорреляционная функция сигналов различных регистрируемых каналов ИРНР (вверху — модуль, внизу — фаза), полученная при моделировании Солнца, Крабовидной туманности и множества случайно расположенных ДКР в секторе обзора ИРНР. Черными линиями показаны модельные траектории Солнца и Крабовидной туманности

Полученные результаты можно использовать для процедуры гидирования ДКР при выполнении наблюдений. Однако для детализации формы ДКР с использованием фазы кросскорреляционной функции (особенно когда ДКР будет наблюдаться на краях ДН) необходимо провести дополнительные исследования нелинейных характеристик антенной системы ИРНР.

Публикации:

Васильев Р.В., Глоба М.В., Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Модель сигнала дискретного космического радиоисточника для Иркутского радара некогерентного рассеяния // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. РРВ-25: Труды конф. Томск, 4–9 июля 2016 г. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. Т. 3. С. 122–125. http://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/ru/abstr_8079.pdf.

3.1.5. Определение параметров распределения яркости по диску Солнца в метровом диапазоне длин волн при помощи Иркутского радара НР

Предложенный ранее метод построения двумерных распределений корреляционной функции сигналов, полученных независимыми измерительными каналами ИРНР, для визуализации дискретного космического радиоисточника [5] был использован для наблюдения спокойного Солнца и солнечных радиобурь. Проведено сравнение двумерных распределений сигнала Солнца, полученных на ИРНР, с изображениями, получаемыми на радиогелиографе Nancay. Для сравнения было выбрано три дня: 21 июня 2012 г., когда Солнце было спокойным, и 16 и 17 июня 2012 г., когда наблюдались сильные шумовые бури (рис. 81, 82). Несмотря на неполноценность получаемого на ИРНР изображения солнечного диска, из рисунков видно, что угловые размеры наблюдаемых источников схожи как для спокойного Солнца, так и для шумовых бурь.

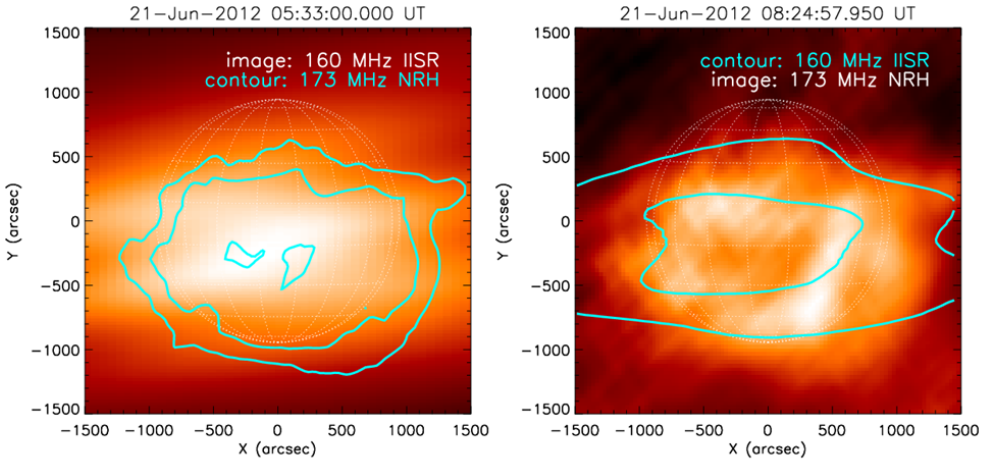


Рис. 81. Сравнение данных ИРНР и Nancay: слева — изображение ИРНР с контурами Nancay; справа — изображение Nancay с контурами ИРНР

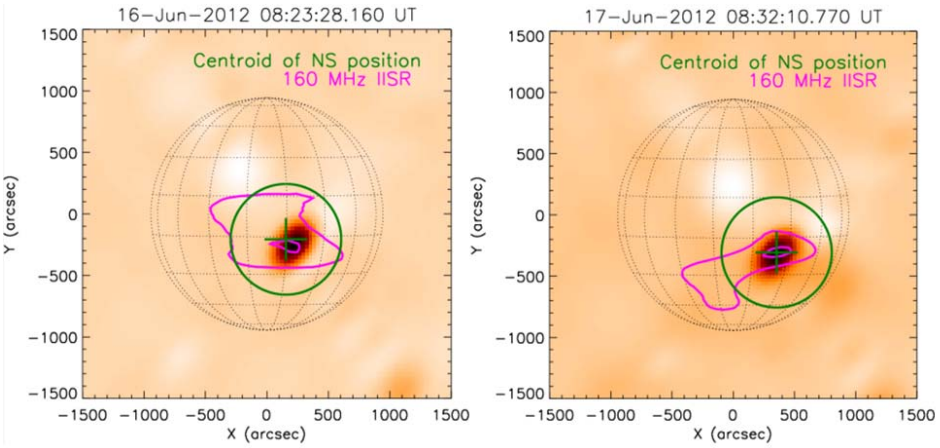


Рис. 82. Изображения, полученные Nancay, с контурами, полученными по данным ИРНР (розовые линии), для шумовых бурь: слева — 16 июня 2012; справа — 17 июня 2012

Сравнение данных ИРНР с данными радиогелиографа Nancay показало, что, хотя и невозможно построить полноценное изображение солнечного диска с использованием данных ИРНР, полученные распределения позволяют определять некоторые параметры истинного распределения радиояркости по диску Солнца, такие как угловой размер источника возмущения и его положение. Эти данные могут быть использованы для мониторинга солнечной активности в метровом диапазоне длин волн в промежуток времени с 3 до 7 UT.

Публикации:

1. Глоба М.В., Васильев Р.В., Кушнарев Д.С., Медведев А.В. Интерферометрические наблюдения мерцаний дискретного радиоисточника Лебедь-А на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 24–31. DOI: 10.12737/13528.

2. Globa M., Reid H., Kashapova L., Vasilyev R., Lebedev V., Kushnarev D., Medvedev A. The first results of the 2D solar observations obtained by Irkutsk incoherent scatter radar // CESRA 2016: Solar radio physics from the chromosphere to near Earth.

3.1.6. Оценка потенциала перспективного радара НР-МСТ

Была проведена оценка потенциала радара НР-МСТ, которая показала, что радар позволит исследовать нейтральную атмосферу на высотах до 30 км с помощью рассеяния на турбулентностях, наблюдать на высотах мезосферы летнее мезосферное эхо, изучать ионосферу на высотах от 60 км, а также проводить интерферометрические наблюдения.

В проект Национального гелиогеофизического комплекса Российской академии наук входит строительство радара НР-МСТ, представляющего собой две фазированные решетки 40×40 м^2, разнесенные на 100 м, с рабочим диапазоном частот 154–162 МГц. Задачами радара являются регулярные наблюдения параметров нейтральной и ионизированной атмосферы, исследование процессов переноса энергии от нижних слоев атмосферы до верхних, интерферометрические наблюдения космических объектов и тонкой структуры атмосферных неоднородностей, радиоастрономические наблюдения.

Наблюдение ионосферы осуществляется методом некогерентного рассеяния (НР), наблюдение нейтральной атмосферы — с помощью рассеяния на турбулентных флуктуациях, интерферометрические наблюдения — по разнице фаз сигналов, принятых на разнесенных антеннах. Оценка потенциала представляет собой сопоставление чувствительности радара с ожидаемым уровнем сигнала рассеяния или отражения. В качестве чувствительности радара принята минимальная удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) $\sigma_{мин}$ [1/м], которой должна обладать среда для получения заданной статистической достоверности оценок параметров. Тогда отношение УЭПР среды $\sigma_{ср}$ к чувствительности радара $\sigma_{мин}$ покажет возможность проведения измерений на заданной высоте. Если $\sigma_{ср}/\sigma_{мин}>1$, то проведение измерений возможно. На рис. 83 показано такое сопоставление для НР-наблюдений при оценке электронной концентрации, температуры и скорости дрейфа для двух режимов работы: НР-1 (100–600 км) и НР-2 (> 600 км). Из рисунка видно, что радар позволит проводить оценку параметров ионосферы на высотах до 1500 км в заданных режимах.

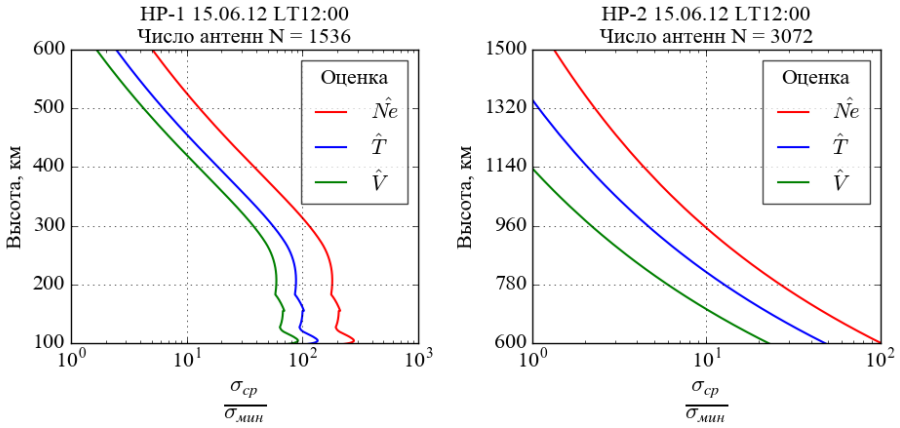


Рис. 83. Потенциал при исследовании ионосферы методом НР

На рис. 84 показана чувствительность радара при разрешении космических аппаратов (КА) и космического мусора (КМ) для разных отношений сигнал/шум, достаточных для устойчивой работы алгоритмов обработки.

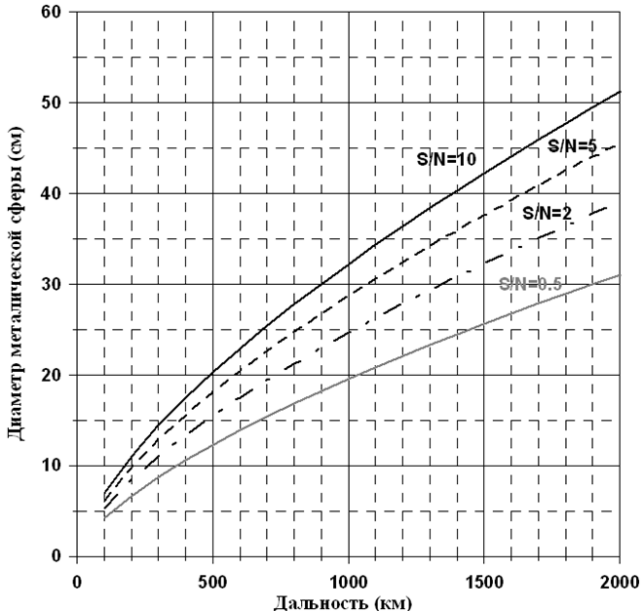


Рис. 84. Чувствительность НР-МСТ-радара в режиме радиолокации КА и КМ

Таким образом, радар НР-МСТ позволит исследовать нижнюю, среднюю и верхнюю атмосферу, в частности, на регулярной основе оценивать скорость нейтрального ветра и интенсивность турбулентностей в нейтральной атмосфере и мезосфере (при наблюдении летнего мезосферного эха), электронную концентрацию, температуру и скорость дрейфа плазмы в ионосфере. Широкий сектор обзора радара и высокая чувствительность позволят определять параметры орбиты космических объектов и исследовать тонкую структуру атмосферных неоднородностей.

Публикации:

1. Потехин А.П., Сетов А.Г., Лебедев В.П., Медведев А.В., Кушнарев Д.С. Перспективный радар НР-МСТ. Потенциал и диагностические возможности // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 3–16. DOI: 10.12737/19444.

2. Сетов А.Г., Медведев А.В., Лебедев В.П., Кушнарев Д.С. Расчет потенциала перспективного радара НР-МСТ при исследовании нижней и средней атмосферы // Тезисы докладов Четырнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, 14–18 ноября 2016 г. С. 436.

3.1.7. Работы по обеспечению совместимости Иркутского радара НР с новой радиолокационной станцией «Воронеж М»

Уникальная научная установка Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР), принадлежащая ИСЗФ СО РАН, создана на базе радиолокационной станции (РЛС) «Днепр». РЛС данного типа работают совместно и имеют штатные средства синхронизации друг с другом. С момента создания ИРНР также работал в сети РЛС «Днепр» и не вызывал помех в работе этих станций.

В связи с модернизацией средств системы предупреждения о ракетном нападении, на месте расположения ИРНР «Усолье-Сибирское-7» был построен радиолокационный комплекс (РЛК) нового поколения «Воронеж», который должен заменить РЛС «Днепр». РЛК работает в том же частотном диапазоне, что и РЛС «Днепр» и ИРНР, но в силу специфики своих задач не предусматривает синхронную беспомеховую работу со станциями предыдущего поколения, включая ИРНР. Поэтому после ввода в эксплуатацию нового РЛК любая работа на ИРНР оказывается невозможной.

РЛК и ИРНР имеют принципиально разную временную схему работы систем приема и передачи сигналов. Системы ИРНР выполняют периодическое излучение зондирующих сигналов фиксированной длительности (2 мс) с тактовой частотой 24.4 Гц. Остальное время такта РЛС занято приемным стробом. В РЛК реализована непериодическая схема расстановки приемных и передающих стробов, что означает возможность появления строба в любом месте такта, а также с переходом из такта в такт. К тому же длительность такта отлична от длительности такта ИРНР. Таким образом, обеспечение совместной беспомеховой работы двух РЛС возможно только при синхронизации времени их излучения и приема, т. е. при выполнении двух условий:

- нельзя излучать в то время, когда другая РЛС ведет прием сигнала;
- нельзя принимать сигнал, когда другая РЛС излучает сигнал.

Помимо этого должны быть также выполнены следующие условия:

- функциональные характеристики РЛК при взаимной синхронизации с ИРНР не должны быть снижены;
- принятые меры при взаимной синхронизации РЛК и ИРНР не должны изменять (понижать) уровень защиты средств РЛК от несанкционированного доступа.

Для решения задачи синхронизации работы РЛК и ИРНР с выполнением перечисленных требований была разработана система синхронизации (СС) ИРНР и РЛК. Эта система обеспечивает подключение ИРНР к РЛК в качестве дополнительной позиции. В данном случае ИРНР подключается в качестве ведомой РЛС, работающей на спланированном временном ресурсе. Другими словами, планирование временного ресурса производится штатными средствами системы управления РЛК. Дополнительная позиция, получая временную диаграмму работы РЛК, планирует свою работу, исходя из текущего расположения во времени стробов приема и передачи (излучения) с соблюдением принципов синхронной работы позиций.

Такая схема позволяет:

- не снижать функциональных возможностей РЛК за счет того, что планирование временного ресурса производится только в интересах РЛК;
- обеспечить синхронность работы дополнительной позиции (ИРНР) с РЛК, обеспечив таким образом отсутствие взаимных помех РЛК и ИРНР.

Разработка СС началась в 2014 г. и включала в себя:

- прокладку оптической линии связи между РЛК и ИРНР;
- создание аппаратуры формирования и приема синхросигналов на обоих концах (РЛК и ИРНР);
- создание программного обеспечения (ПО) для формирования синхросигналов;
- доработку управляющего ПО ИРНР;
- оформление документации на все блоки СС;
- проведение предварительных и межведомственных испытаний (МВИ) СС.

На рис. 85 приведена блок-схема СС.

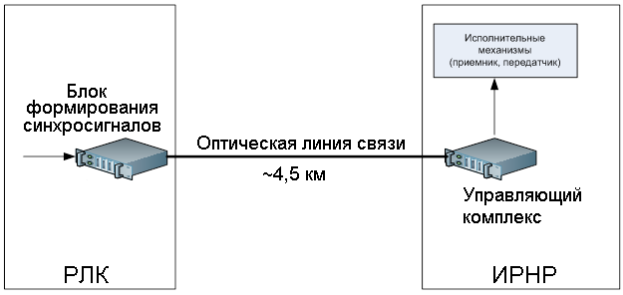


Рис. 85. Блок-схема системы синхронизации

В 2015–2016 гг. была проведена серия предварительных испытаний СС, в ходе которых была показана принципиальная возможность совместной работы двух станций, а также были выявлены и устранены некоторые недостатки СС.

С 30 апреля по 1 августа 2016 г. совместно с ОАО РТИ им. А.Л. Минца состоялись межведомственные долговременные испытания СС совместного функционирования РЛК И ИРНР. В периоды времени, выделенные для проведения испытаний СС, проводились накопление и статистический анализ данных о взаимном влиянии двух радиолокационных комплексов. Одновременно с этими экспериментами, а также во время штатных наблюдений НР проводились наблюдения для разработки методики локации когерентного эха и анализа его характеристик. Общая длительность таких наблюдений составил 425 ч.

Результаты испытаний показали, что данная система обеспечивает беспомеховое совместное функционирование ИРНР и РЛК «Воронеж». После проведения испытаний и анализа полученной информации было выработано совместное решение о том, что система синхронизации испытания выдержала и рекомендована к применению.

3.1.8. Исследование динамики среднеширотной ионосферы с помощью Иркутского радара НР

Был разработан и внедрен программный комплекс автоматической корреляционной обработки сигналов НР, позволяющий в режиме реального времени при минимальном участии оператора получать полный набор параметров ионосферы. Программный комплекс реализует вычисление автокорреляционной функции (АКФ) с различной задержкой (от 8 мкс до величины длительности импульса), для различных высот (от 166 до 1300 км, с шагом от 1.5 км), с различной длительностью накопления (от 40 с до 15 мин). Затем рассчитанные значения АКФ для каждого момента времени и для каждой высоты с заранее заданным шагом сохраняются в виде корреляционных матриц в отдельный файл.

Сохранение данных в таком виде позволяет проводить более гибкую вторичную обработку, менять длительность интегрирования по времени и высоте, при расчете спектров, полученных АКФ, складывать каналы приема с различной фазой, производить шумовую коррекцию, убирая шумовую подложку, вычитая шум с конца высотной развертки. И, наконец, программный комплекс позволяет получать ключевые параметры АКФ сигнала НР и с их помощью рассчитывать такие параметры ионосферной плазмы, как температуры ионов и электронов, а также позволяет производить фитирование фазы АКФ и рассчитывать скорость дрейфа плазмы вдоль луча зрения радара с последующим получением скорости нейтрального меридионального ветра. Подгонка для различных гелио- и геофизических условий может осуществляться с помощью варьирования границ фитирования.

Программный комплекс обработки как сигналов НР используется для обработки как регулярных наблюдений, так и наблюдений ионосферных эффектов, связанных с внезапными стратосферными потеплениями, солнечными затмениями, сильными магнитными бурями и другими явлениями.

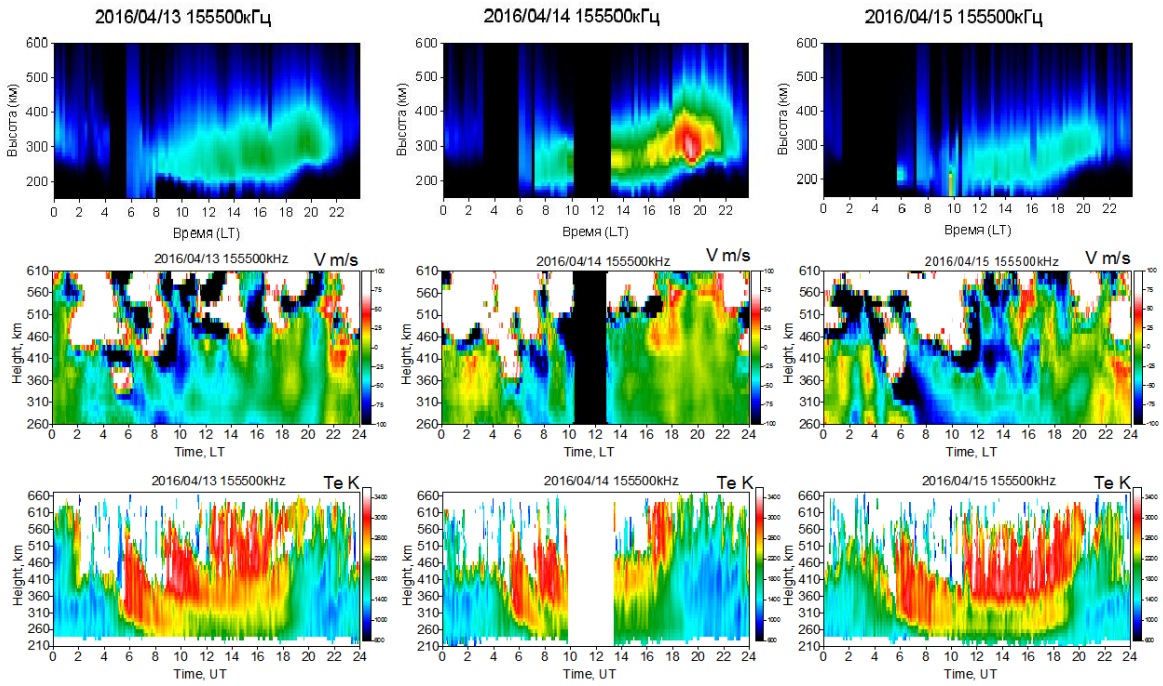


Рис. 86. Верхняя панель — электронная концентрация, средняя панель — скорость дрейфа плазмы, нижняя панель — температура электронов 13–15 апреля 2016 гг.

На рис. 86 показано поведение параметров ионосферы 13–15 апреля 2016 г., в том числе во время сильной геомагнитной бури наблюдавшейся 13–14 апреля. На рисунке видно, что 14 апреля значительно возрастает электронная концентрация и падает температура электронов. При этом 14 апреля с 16 до 18 ч местного времени наблюдается всплеск скорости дрейфа плазмы на высотах 400–500 км, в это же время наблюдаются резкий рост электронной концентрации и общий подъем высоты максимума F2-слоя.

Публикации:

1. Ратовский К.Г., Щербаков А.А., Алсаткин С.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Сравнительный анализ измерения электронной концентрации во внешней ионосфере // Сборник тезисов докладов VII Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». 2016. С. 45.

Список использованных источников:

1. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Kushnarev D.S. Method for studying the Spatial-Temporal Structure of wave-like disturbances in the ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, N 6. P. 775–785.

2. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 105–106, P. 350–357. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.09.001.

3. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. A statistical study of internal gravity wave characteristics using the combined Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 132. P. 13–21. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.06.012.

4. Pogoreltsev A.I., Pertsev N.N. The influence of background wind on the formation of the acoustic-gravity wave structure in the thermosphere // Izvestiya. Atmos. Oceanic Phys. 1996. V. 132, N 6. P. 723–728.

5. Глоба М.В., Васильев Р.В., Кушнарев Д.С., Медведев А.В. Интерферометрические наблюдения мерцаний дискретного радиоисточника Лебедь-А на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 24–31. DOI: 10.12737/13528.

3.2. Распространение радиоволн различных диапазонов в ионосфере Земли

3.2.1. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ-радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн

Разработанные в ИСЗФ СО РАН [1–3] методы расчета характеристик коротковолновых (КВ) сигналов, рассеянных как на локальных неоднородностях ионосферной плазмы, так и земной поверхностью, базируются на комплексном алгоритме расчета характеристик распространения КВ-радиоволн на основе модели ионосферы и метода нормальных волн [4, 5]. При выполнении проекта была проведена модификация метода нормальных волн для решения радиальной задачи и построения спектра радиального оператора. Разработан численный алгоритм расчета поля для рабочих частот низкочастотной части декаметрового и средневолнового диапазона, для которых существует регулярный волновод Земля–ионосфера и число нормальных волн достаточно велико [6]. На базе алгоритмов и программ был разработан комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ-радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы на трассах различной протяженности и ориентации в диапазоне 2–30 МГц.

Модель ионосферы и плазмосферы

Теоретическая модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия, разработанная в ИСЗФ СО РАН [7–9] основана на численном решении системы нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в дрейфующих плазменных трубках дипольного типа, основания которых расположены на высоте 100 км. Полагается, что плазма состоит из атомарных (O^+, H^+) и молекулярных (N_2^+, O_2^+, NO^+) ионов, которые рассматриваются как один ион с эффективной массой 30 а.е.м. Концентрации всех ионов рассчитывались с учетом процессов фотоионизации, рекомбинации и переноса вдоль геомагнитных силовых линий под действием амбиполярной диффузии и увлечения ионов горизонтальным нейтральным ветром. Для расчета скоростей фотоионизации термосферных составляющих и энергетических спектров первичных фотоэлектронов использован справочный спектр ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца. Температуры электронов и ионов рассчитывались с учетом процессов теплопроводности вдоль геомагнитных силовых линий и обмена тепловой энергией между электронами, ионами и нейтральными частицами вследствие упругих и неупругих столкновений. Скорость нагрева тепловых электронов рассчитывалась согласованно, путем решения кинетического уравнения переноса фотоэлектронов в сопряженных ионосферах, учитывая потери энергии фотоэлектронами при прохождении через плазмосферу.

Все плазменные трубки в модели рассматриваются как замкнутые или разомкнутые (открытые). Критерием такого деления служит факт нахождения основания трубки внутри полярной шапки. Если силовая линия, проходящая через плазменную трубку, лежит вне полярной шапки, т. е. в области авроральной ионосферы или плазмосферы, то трубка является замкнутой. В противном случае, когда силовая линия выходит из области полярной шапки и уходит в хвост магнитосферы, трубка рассматривается как открытая. В качестве граничных условий для замкнутых трубок принято условие равенства нулю потоков частиц и энергии через основания трубки (h=100 км). Для открытых трубок на верхней границе, которая задавалась на расстоянии нескольких радиусов Земли, принималось условие ухода заряженных частиц из силовой трубки в магнитосферу через открытое сечение, т. е. полагалось, что $n_i(t, r_{\max})=0$. Для уравнений теплового баланса на верхней границе задавался нулевой приток тепла из магнитосферы. В данной модели расчеты начинаются с некоторых произвольных начальных условий, соответствующих низкому содержанию плазмы в трубке, с целью учета процесса заполнения плазмосферы из нижележащей ионосферы. Начальные условия задаются на удалении 3 сут от рассматриваемого момента времени в виде слабой заполненности трубок плазмой, температура которой равна температуре нейтралов.

Для описания пространственно-временных вариаций температуры и концентраций нейтральных компонентов O, O_2, N_2, H и N использовалась глобальная эмпирическая модель термосферы NRLMSISE-00, а скорости горизонтального термосферного ветра определялись согласно эмпирическим моделям HWM07 и DWM07. Значения интегрального потока и средней энергии высыпающихся электронов, необходимые для расчета скоростей авроральной ионизации, взяты в соответствии с глобальной моделью электронных высыпаний [10]. В расчетах изменения параметров термосферы и характеристик высыпающихся электронов со временем учитываются через вариации часовых значений индексов геомагнитной активности (K_p, A_p) соответствующие выбранным датам. Электрическое поле магнитосферной конвекции рассчитывалось в соответствии с эмпирической моделью распределения потенциала магнитосферной конвекции на высотах ионосферы [11]. Общий алгоритм решения модельных уравнений подробно изложен в [7, 9].

Для расчета ионизации в нижней ионосфере (40–100 км) в модель добавлен блок, разработанный на основе глобальной полуэмпирической прогностической модели D-области ионосферы. Блок нижней ионосферы позволяет рассчитать распределение электронной концентрации в спокойных условиях и при воздействии солнечных вспышек классов C5, M5 и X1 в диапазоне от 0 до 225° E и от 45 до 70° N (полностью покрывается территория РФ). Таким образом, ионосферная часть комплекса позволяет рассчитать высотные профили (от 40 до 500 км и выше) характеристик ионосферы в заданный момент времени в указанном долготно-широтном диапазоне как в спокойные, так и в геомагнитно-возмущенные периоды, а также во время солнечных вспышек.

Модель распространения радиоволн

Рассматривается азимутально-симметричный неоднородный сферический волновод Земля–ионосфера. Для квазимонохроматических сигналов с несущей частотой ω выражение для $E_\varphi(\vec{r},t)$ можно записать в виде ряда нормальных волн [6, 12]:

$$E_\varphi(\vec{r},t)=\mathrm{Re}\sum_{n=n_1}^{n_m}\left[B_n(\vec{r})g_0(t-\tau_n)e^{i\Psi n(\vec{r})}\right]e^{-i\omega t}, \tag{5}$$

где $g_0(t)$ — огибающая излученного импульса, $\tau_n(\vec{r})=\int_0^\theta \frac{d\theta'}{\upsilon_n(\theta')}$ — задержка нормальной волны на заданную дальность θ, υ_n — групповая скорость распространения волны по θ, $B_n(\vec{r})$ — амплитудный множитель, $\Psi_n(\vec{r})=ka\int_0^\theta(\gamma_n+i\nu_n)d\theta'$ — фаза волны. Поле отдельной нормальной волны распределено по всему сечению волновода и зависит от его глобальных характеристик. Суммарное же поле локализовано вблизи траектории луча, где выполнено условие фазировки отдельных групп волн (условие стационарности), которое имеет вид

$$\triangle\Psi_n(\vec{r})=\frac{1}{2\pi}\left(\Psi_n-\Psi_{n+1}\right)=l, \tag{6}$$

где l — целое число. Угол выхода траектории Δ из точки излучения связан с центральным номером n_i группы сфазированных нормальных волн соотношением $\cos\triangle=\gamma_{ni}/y_b\sqrt{\varepsilon}$.

Приведенные выше выражения служат формульной основой расчета распределения поля декаметрового сигнала в волноводе по методу нормальных волн. На первом этапе по заданным из модели ионосферы и плазмосферы профилям электронной концентрации $N(y)$ и эффективной частоты соударений $\nu_{\mathrm{eff}}(y)$ рассчитываются характеристики нормальных волн B_n, Ψ_n, τ_n, $\Delta\Psi_n$ в опорных точках спектра. Решение уравнения (6) относительно номера n позволяет определить модовую структуру сигнала (количество сигналов и их идентификацию) и рассчитать временные и угловые характеристики сигналов. Огибаю-

щая импульсного сигнала $B(\vec{r},t)$ вычисляется на основе прямого численного суммирования выражений вида [7]:

$$B(\vec{r},t)=\left[\left(\sum_{n_1}^{n_m}B_n(\vec{r})g_0\left(t-\tau_n(\vec{r})\right)\cos\Psi_n(\vec{r})\right)^2+\left(\sum_{n_1}^{n_m}B_n(\vec{r})g_0\left(t-\tau_n(\vec{r})\right)\sin\Psi_n(\vec{r})\right)^2\right]^{1/2}. \quad (7)$$

Расчет огибающей $B(\vec{r},t)$ в точке приема позволяет исследовать форму принимаемого сигнала как для разделенных во времени импульсов, так и для перекрывающихся. Амплитудные характеристики КВ-сигналов рассчитываются с учетом антенно-фидерных устройств для передающих и приемных антенн.

Результаты моделирования

Моделирование характеристик распространения радиоволн проводилось на базе созданного по комплексному алгоритму аппаратно-программного комплекса, включающего модули расчета глобальной модели ионосферы и характеристик распространения радиоволн в рамках волноводного подхода. Верификация комплекса в режиме прогноза максимальных применимых частот (МПЧ) радиосвязи по экспериментальным данным на сети радиотрасс наклонного зондирования (НЗ) в Северо-Восточном регионе России показала его эффективность в различных гелиогеофизических условиях. На рис. 87 приведены суточные вариации медианы экспериментальных МНЧ (крестики) для мода распространения 1F в январе 2014 г. на трассе Норильск–Иркутск. Здесь же приведены результаты расчета МПЧ мода 1F по модели ионосферы и плазмосферы (сплошная линия). На рис. 88 приведены суточные вариации медианы МНЧ и расчетной МПЧ мода 1F в феврале 2014 г. на трассе Хабаровск–Иркутск.

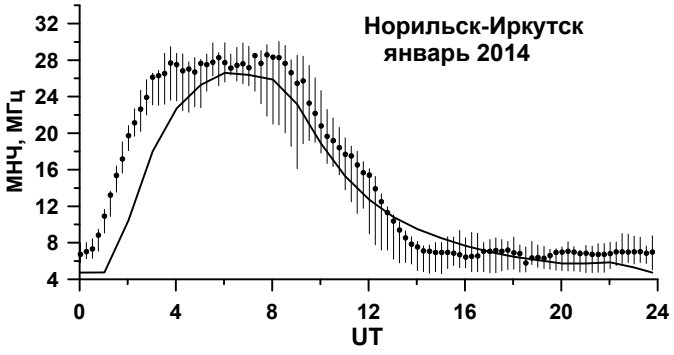


Рис. 87. Суточный ход медианы МНЧ и расчетной МПЧ на трассе Норильск–Иркутск

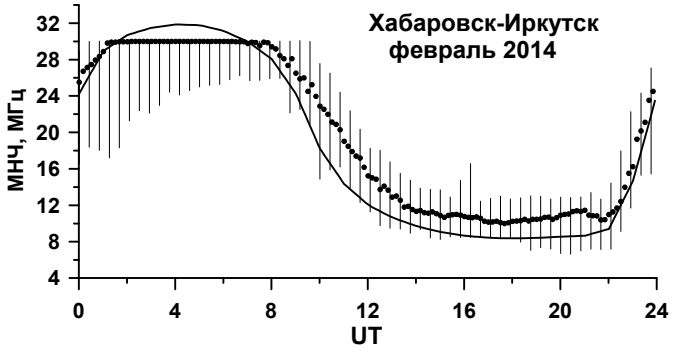


Рис. 88. Суточный ход медианы МНЧ и расчетной МПЧ на трассе Хабаровск–Иркутск

Аномально повышенное поглощение коротковолновых сигналов за счет роста ионизации в нижних слоях ионосферы во время солнечных вспышек может приводить как к увеличению наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) радиосвязи, так и к исчезновению сигналов, соответствующих модам с многократным отражением от ионосферного слоя. В зависимости от степени освещенности трассы и мощности солнечной вспышки может наблюдаться «блэкаут» во всей полосе частот зондирования. Результаты моделирования дистанционно- и амплитудно-частотных характеристик распространения КВ-сигналов с учетом технических параметров радиоканала позволяют оценить затухание радиоволн.

На рис. 89 приведены экспериментальные ионограммы НЗ до начала солнечной вспышки балла X 4.9 (25 февраля 2014 г., 00:40 UT) и после вспышки (25 февраля 2014 г., 00:50 UT). Результаты расчета дистанционно-частотной характеристики сигнала по выбранному относительному уровню амплитуды 50 дБ нанесены линиями. Из сопоставления экспериментальных и расчетных ионограмм НЗ расчетная оценка дополнительного поглощения радиоволн по модели ионосферы и плазмосферы в условиях солнечной вспышки на низких частотах составляет ~40 ÷ 50 дБ.

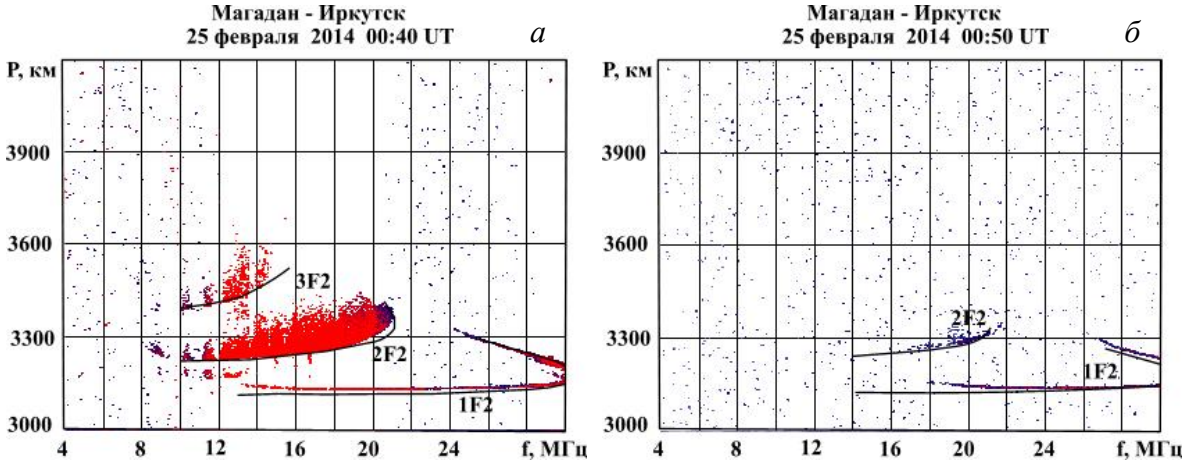


Рис. 89. Ионограммы наклонного ЛЧМ-зондирования на трассе Магадан–Иркутск и результаты моделирования ДЧХ: *а* — 00:40 UT, *б* — 00:50 UT 25 февраля 2014 г.

На основе разработанного комплексного алгоритма было создано вычислительное ядро макета программного комплекса для расчета параметров ионосферы и характеристик распространения радиоволн, включая глобальные прогностические модели D-слоя ионосферы, ионосферы и плазмосферы на высотах 40–20 000 км и модель распространения радиоволн в диапазоне частот 2–30 МГц.

3.2.2. Разработка метода расчета характеристик КВ-сигналов, рассеянных на локальных неоднородностях ионосферной плазмы и земной поверхностью, на основе метода нормальных волн

Одним из эффективных цифровых средств диагностики ионосферы является ЛЧМ-ионозонд [13, 14]. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд, работающий в режимах вертикального (ВЗ), наклонного (НЗ) и возвратно-наклонного (ВНЗ) зондирования, может являться базовым элементом системы мониторинга состояния ионосферы и условий распространения радиоволн. В работе представлены методики и алгоритмы обработки и интерпретации ионограмм возвратно-наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ-сигналом. Результаты оперативной диагностики КВ-радиоканала по текущим данным ВНЗ могут быть использованы для восстановления пространственного распределения электронной концентрации в секторе зондирования ионосферы ЛЧМ-ионозондом в режиме ВНЗ.

Вторичная обработка ионограмм

Обработка ионограмм включает [15]:

а) проведение предобработки ионограмм для удаления шума с изображения и улучшения амплитудных характеристик;

б) сжатие данных, позволяющее провести сокращение их объема без существенной потери полезной информации.

Предобработка ионограммы заключается в ее очистке от шумовых составляющих с целью выделения полезного сигнала на фоне шума и помех, а также удаления одиночных выбросов, которые имеют интенсивность, сравнимую с полезным сигналом. Для исключения шума применяются локальные методы сглаживания, имеющие высокую вычислительную эффективность и позволяющие проводить обработку изображений в реальном времени. Для удаления шума на изображении и восстановления отсчетов сигнала используется медианный фильтр, который позволяет сглаживать помехи и уменьшать размытие границ треков, а также восстанавливать значения в разрывах треков. При переходе между реализациями на соседних частотах низкая корреляция между шумовыми помехами приводит к тому, что помеха становится импульсной и лучше всего удаляется медианным фильтром.

Методика сжатия данных применяется для выделения точек со значимой амплитудой, физически соответствующих величинам – моментам прихода сигнала по переднему фронту сигнала или максимуму амплитудного рельефа. Для отсева одиночных артефактов, частичного восстановления данных и выявления первичного трека на ионограмме эффективен механизм клеточного автомата. Клеточные автоматы — это дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется локальными взаимными связями их элементов. В результате остаются точки на гребнях треков и незначительная часть шума. Реализованный алгоритм позволил достигнуть сжатия исходной информации в 5–10 раз в зависимости от уровня шума и диффузности [15].

На рис. 90 приведены ионограмма ВНЗ (*а*) и результаты вторичной обработки данных (*б*). Пункт излучения — Усолье-Сибирское (52.88° N, 103.26° E). Пункт приема — Торы (51.70° N, 103.0° E). Азимут излучения — 55°. Время регистрации — 22.01.2007, 04:16 UT.

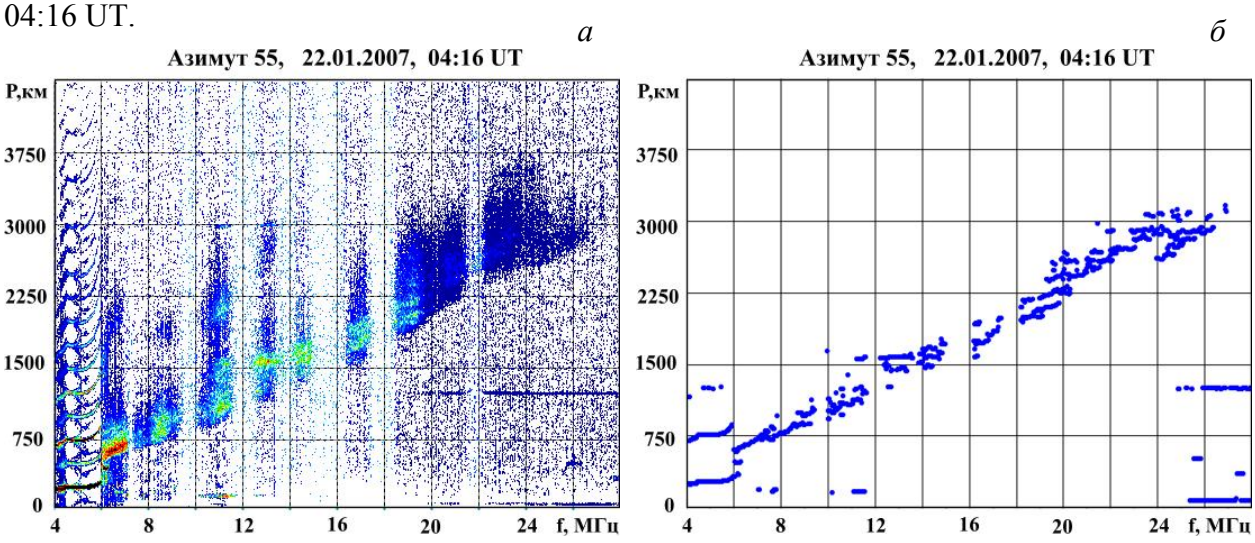


Рис. 90. Ионограмма ВНЗ и результаты вторичной обработки: 04:16 UT 22.01.2007

Методика интерпретации ионограмм

При моделировании характеристик сигналов НЗ и ВНЗ и анализе экспериментальных данных были выявлены следующие слабо меняющиеся при вариациях параметров ионосферы соотношения [16]:

- отношение группового пути P_m, соответствующего переднему фронту сигнала ВНЗ, к дальности до границы освещенной зоны $D_m(P_m/D_m)$;
- ДЧХ мода наклонного распространения на относительной сетке частот $\beta=f/f_m$, где f_m — МПЧ мода для рассматриваемой дальности ($P(\beta)$).
- ДЧХ сигнала ВНЗ по переднему фронту на относительной сетке частот $\nu=f/f_m$, где f_m — МПЧ для максимальной дальности распространения сигнала ВНЗ.

Данные соотношения позволяют решать следующие задачи оперативной диагностики декаметрового радиоканала по текущим данным регистрации ионограмм НЗ и ВНЗ:

- интерпретация модов распространения на экспериментальных ионограммах ВНЗ по точкам со значимой амплитудой, полученным в результате вторичной обработки;
- восстановление полной ДЧХ сигналов ВНЗ по фрагментам «следов» на экспериментальной ионограмме;
- оперативное определение модового состава, МПЧ каждого мода и ДЧХ сигналов НЗ на заданной радиотрассе по данным ВНЗ.

Алгоритм восстановления ДЧХ ВНЗ базируется на адиабатической зависимости минимального группового пути рассеянного земной поверхностью сигнала на относительной сетке частот $\nu=f/f_m$ при изменении параметров ионосферы. Для прогнозных параметров ионосферы на сетке частот проводится расчет ДЧХ сигналов ВНЗ по переднему фронту. Прогнозная ДЧХ сигнала ВНЗ пересчитывается на относительную сетку частот ν. В качестве начальной частоты f_m выбирается МПЧ для максимальной дальности распространения сигнала. После вторичной обработки экспериментальной ионограммы ВНЗ имеется матрица экспериментальных точек, соответствующая двумерному массиву значений группового пути P_i на сетке частот f_j для точек со значимой амплитудой. Экспериментальные точки также переводятся на относительную сетку частот ν. Алгоритм идентификации модов распространения на ионограмме ВНЗ в автоматическом режиме заключается в определении максимума гистограммы распределения числа экспериментальных точек, попадающих в модельную маску, построенную по долгосрочному прогнозу, при изменении частоты f_m на относительной сетке частот $\nu=f/f_m$.

На рис. 91 приведены результаты вторичной обработки и интерпретации ионограммы ВНЗ, приведенной на рис. 90. Черной и зеленой линиями нанесены результаты моделирования P_m и D_m по долгосрочному прогнозу, красной — интерпретированная ДЧХ ВНЗ, синие точки — точки со значимой амплитудой сигнала ВНЗ. Расчет P_m и D_m по долгосрочному прогнозу проводился по модели IRI.

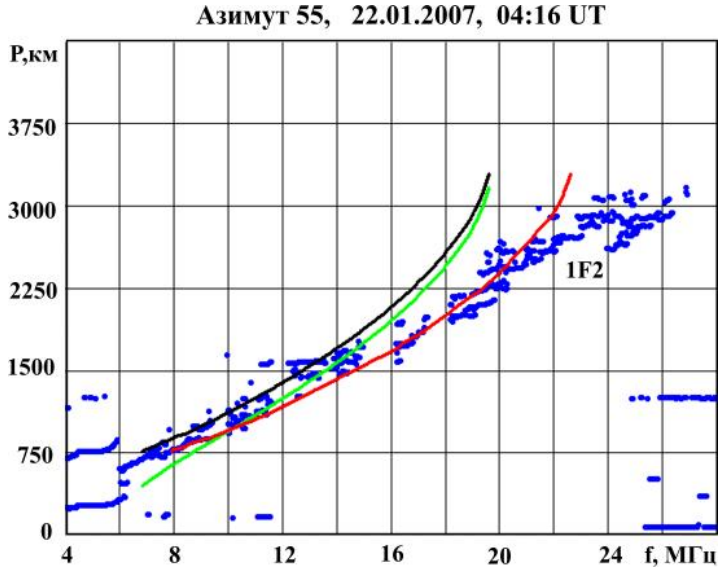


Рис. 91. Результаты вторичной обработки и интерпретации ионограммы ВНЗ, 04:16 UT 22.01.2007: P_m — черная линия, D_m — зеленая линия, ДЧХ ВНЗ — красная линия

На рис. 92 приведены ионограмма ВНЗ и результаты вторичной обработки и интерпретации для случая, когда из-за сильного поглощения на трассе или при зондировании на ограниченном интервале частот на ионограммах ВНЗ отсутствуют сигналы, рассеянные с дальностей, для которых требуется определить характеристики радиосвязи. Пункт излучения — Усолье-Сибирское (52.88° N, 103.26° E). Пункт приема — Торы (51.70° N, 103.0° E). Азимут излучения — 55°. Время регистрации —13:15 UT 15.06.2005. Видно, что на ионограмме присутствуют сигналы, приходящие в точку приема с различных направлений. На рис. 93 приведены результаты интерпретации сигналов ВНЗ для случая, когда азимут основного направления приемной антенны (антенна БС-2) совпадал с азимутом излучения 55°. Черной и зеленой линиями нанесены результаты моделирования P_m и D_m по долгосрочному прогнозу, красной — интерпретированная ДЧХ ВНЗ, синие точки — точки со значимой амплитудой сигнала ВНЗ. На рис. 94 приведены результаты интерпретации сигналов ВНЗ в предположении, что прием сигналов ВНЗ осуществлялся с противоположного направления относительно азимута излучения — азимут приема 235°.

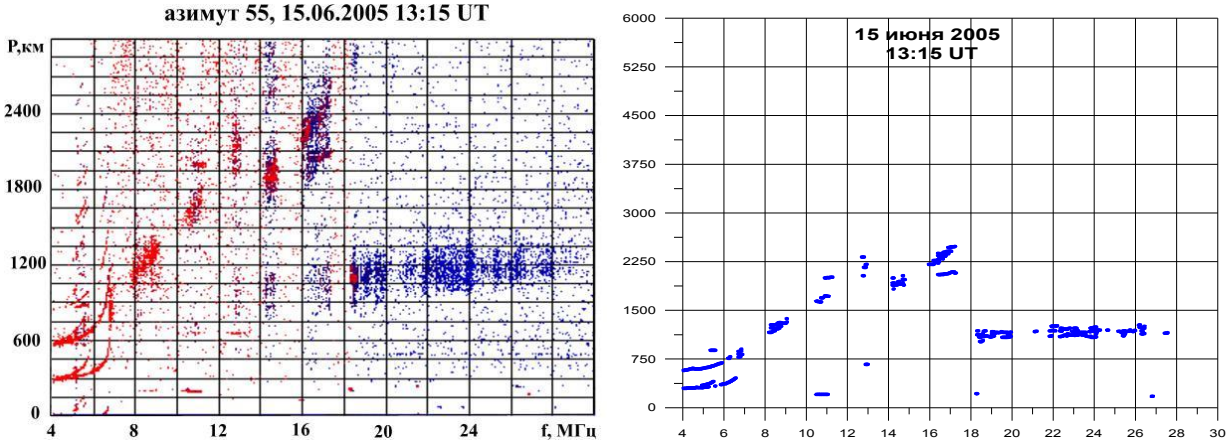


Рис. 92. Ионограмма ВНЗ для 13:15 UT 15.01.2007 и результаты вторичной обработки

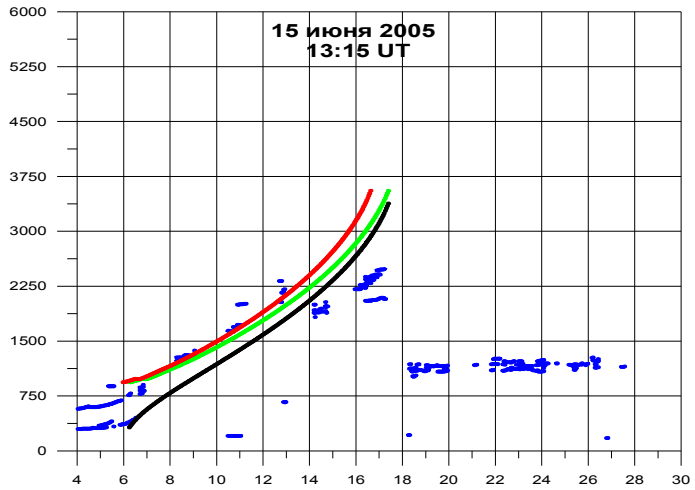


Рис. 93. Результаты вторичной обработки и интерпретации ионограммы ВНЗ для 13:15 UT 15.06.2005: азимут приема — 55°, P_m — черная линия, D_m — зеленая линия, ДЧХ ВНЗ — красная линия

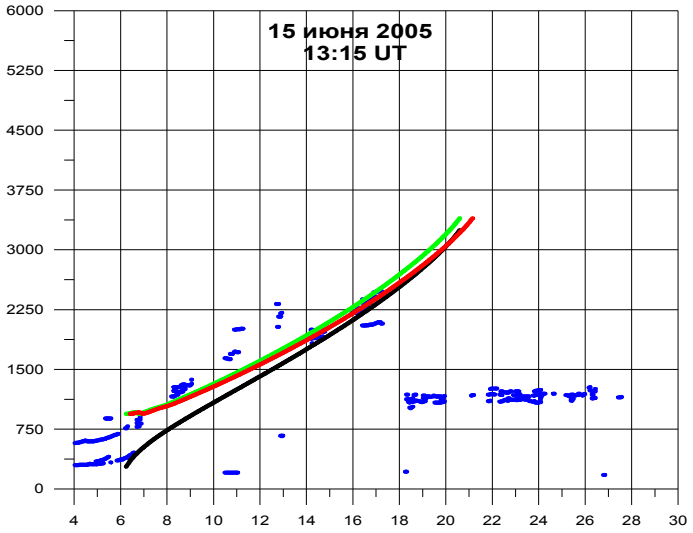


Рис. 94. Результаты вторичной обработки и интерпретации ионограммы ВНЗ для 13:15 UT 15.06.2005: азимут приема — 235°, P_m — черная линия, D_m — зеленая линия, ДЧХ ВНЗ — красная линия

Сигналы ВНЗ на ионограмме в диапазоне частот 18–28 МГц соответствуют отражениям от Es-слоя ионосферы.

3.2.3. Получение радиолокационного уравнения для когерентного радара декаметрового диапазона

Исследования с помощью радаров SuperDARN сегодня становятся одной из основных методик для анализа процессов в высокоширотной ионосфере и магнитосфере.

Расширение сети до средних широт позволяет нам исследовать полярные эффекты в средних широтах во время геомагнитных возмущений и бурь. Несмотря на широкое использование данных, техника инверсии для этого метода — получение ионосферных параметров при помощи полученных сигналов — все еще в стадии разработки.

В настоящее время точное представление о влиянии ионосферной рефракции на характеристики рассеянного сигнала является важной теоретической проблемой.

Основой методики обратного рассеяния, используемой ионосферными радарами, является радиолокационное уравнение. Оно соотносит форму корреляционной функции полученного сигнала со спектральной плотностью неоднородностей и характеристик фоновой ионосферы.

В настоящее время уравнение радиолокации SuperDARN существует только в упрощенном приблизительном виде, что может привести к потенциальным проблемам в интерпретации данных. Например, может возникнуть необходимость принять во внимание рефракцию при оценке основного параметра, измеряемого SuperDARN, — скорости неоднородностей.

Традиционно для интерпретации измерений SuperDARN используется аналогия с уравнением радиолокации для случаев без рефракции. Изначально это уравнение радиолокации было разработано для случая с рассеивателями, которые меньше радиуса зоны Френеля, и не всегда пригодно для неоднородностей размером больше или аналогичным этому радиусу.

Ранее нами было получено радиолокационное уравнение в предположении, что существуют плавные пространственные изменения спектральной плотности неоднородностей. Это радиолокационное уравнение без рефракции актуально для рассеяния крупномасштабных ионосферных неоднородностей, включая неоднородности, вытянутые вдоль магнитного поля Земли и изучаемые с помощью радаров SuperDARN. Однако рефракция

еще не была должным образом принята во внимание.

В данной работе мы получили скалярное радиолокационное уравнение для радаров SuperDARN в рамках первого скачка распространения, принимая во внимание рефракцию и однократное отражение от ионосферы.

Опираясь на подход гамильтоновой оптики и лучевое представление функции Грина, мы получили скалярное радиолокационное уравнение, которое подходит для учета рефракционных эффектов в данных SuperDARN (функции автокорреляции сигналов), полученных этими радарами в рамках расстояний первого скачка, т. е. до рассеяния сигнала от земли. Уравнение имеет вид

$$\tilde{P}(t,\omega)=\sum_{n\in N}\int\limits_{|J_1/\Delta R_A|>1}\tilde{\tilde{\Phi}}\left(\vec{r};-\hat{P}_n^H\left(\vec{r}\right)k,\nu\right)A_n^H\left(\vec{r}\right)\times$$

$$\times\tilde{\tilde{W}}_{2,t}\left(\hat{\Lambda}_n^H(\vec{r}),S_n(\vec{r}),\omega-\nu,\left(kP(\vec{r},\omega_0)-2k_0P^2(\vec{r},\omega_0)\right)-\nu/c\right)k^2dkd\nu d\vec{r}+$$

$$+\int\limits_{\left|J_{1/\Delta R_A}\right|<1}\tilde{\tilde{\Phi}}\left(\vec{R}\left(\hat{\Lambda},S_{SF}\left(\hat{k}_{SF}^Ik\right)\right);k_{SF}^Ik,\nu\right)A^I\left(\vec{R}\left(\hat{\Lambda},S_{SF}\left(k_{SF}^Ik\right)\right)\right)\times$$

$$\times\tilde{W}_{2,t}\left(\hat{\Lambda},S_{SF}\left(k_{SF}^Ik\right),\omega-\nu,0\right)k^2dkd\nu d\hat{\Lambda}+$$

$$+\sum_{m\in N}\sum_{n\in N,\,n<m}\int\tilde{\tilde{\Phi}}\left(\vec{r};\vec{k}_{n,m}\left(\vec{r}\right),\nu\right)2\left(1+\cos\left(\nu\left(T_m\left(\vec{r}\right)-T_n\left(\vec{r}\right)\right)\right)\right)\times$$

$$\times A_{n,m}\left(\vec{r}\right)\tilde{W}\left(t,c\left(T_n\left(\vec{r}\right)+T_m\left(\vec{r}\right)\right),\omega-\nu,0\right)d\nu d\vec{r};$$

$$A_n^H\left(\vec{r}\right)=(2\pi)^2k_0^4\left\{\frac{2}{PF}J_{\hat{P}\to\hat{\Lambda}}\right\};$$

$$A^I\left(\vec{r}\right)=(2\pi)^3k_0^4\left|g_r^*\left(\hat{\Lambda},\omega_0\right)g_t\left(\hat{\Lambda},\omega_0\right)\right|^2\ J_1^2J_{\hat{P}\to\hat{\Lambda}};$$

$$A_{n,m}\left(\vec{r}\right)=\frac{(2\pi)^3k_0^4}{F_nF_m}\left|g_r^*\left(\hat{\Lambda}_n\left(\vec{r}\right),\omega_0\right)g_t\left(\hat{\Lambda}_m\left(\vec{r}\right)\right),\omega_0\right|^2$$

и связывает спектральную плотность неоднородностей Φ с формой зондирующего сигнала, определющего весовое ядро *W*, а также учитывает вклады геометрооптического распространения сигнала *A*.

На рис. 95 приведены зоны ракурсного рассеяния по результатам численного моделирования.

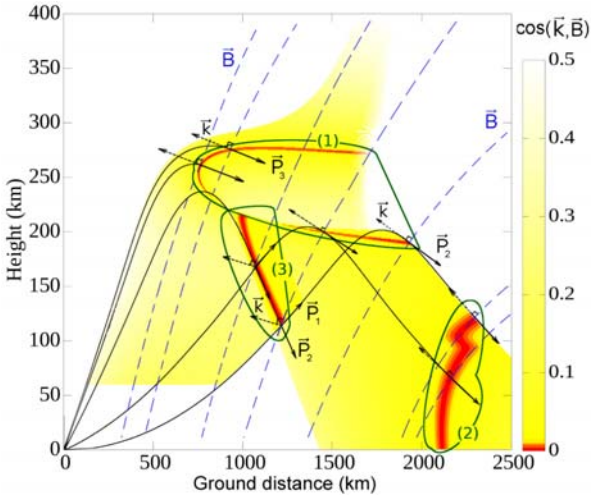


Рис. 95. Зоны ракурсного рассеяния (красный цвет) — однопозиционные (1–2) и двухпозиционная (3) по данным численного моделирования для радара, расположенного вблизи Северного полюса

Уравнение подходит для радаров со значительно более короткими зондирующими импульсами, чем групповая задержка. Это актуально для условий, где начальные геометрооптические приближения справедливы и где спектральная плотность неоднородностей изменяется медленно на пространственных масштабах порядка зоны Френеля.

Публикации:

1. Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN scalar radar equations // Radio Science. 2016. DOI: 10.1002/2016RS006081. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016RS006081/full.

2. Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Kurkin V.I., Penzin V.S. Automatic processing and interpretation of backscatter ionosphere sounding ionograms // Proc. SPIE. 2016. 10035-73. https://spie.org/submissions/tasks.aspx?EventID=2235564.

3. Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Ляхов А.Н., Пензин М.С., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ-радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн // Изв. вузов. Физика. Тематический выпуск. Томск, 2016. http://symp.iao.ru/files/symp/aoo/22/Section%20B.pdf.

4. Пензин М.С., Ильин Н.В Моделирование доплеровского сдвига частоты в многолучевых радиоканалах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 57–63. http://www.naukaru.ru/journal/issue/744/.

Список использованных источников:

1. Куркин В.И., Пономарчук С.Н. Расчет пространственного положения зон фокусировки КВ-сигналов в волноводе Земля–ионосфера // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1989. Вып. 88. С. 193–199.

2. Куркин В.И., Орлов И.И. Схема расчета характеристик КВ-сигналов, рассеянных локализованными неоднородностями в волноводе Земля–ионосфера // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1990. Вып. 92.

3. Куркин В.И., Пономарчук С.Н. Моделирование характеристик ЛЧМ-сигналов при возвратно-наклонном зондировании ионосферы // 61-я научная сессия, посвященная Дню радио: сборник докладов. М., 2006. С. 268–270.

4. Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 124 с.

5. Алтынцева В.И., Ильин Н.В., Куркин В.И., Орлов А.И., Орлов И.И., Полех Н.М., Пономарчук С.Н., Хахинов В.В. Моделирование декаметрового радиоканала на основе метода нормальных волн // Техника средств связи. Серия СС. М.: Экос, 1987. Вып. 5. С. 28–34.

6. Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Пензин М.С. Модель распространения радиоволн в диапазоне частот 1–10 мГц на основе метода нормальных волн // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 33–39.

7. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.

8. Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // Proc. of COSPAR Colloquia Series. 2002. V. 1. P. 315–325.

9. Тащилин А.В., Романова Е.Б. Численное моделирование диффузии ионосферной плазмы в дипольном геомагнитном поле при наличии поперечного дрейфа // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 1. С. 3–17.

10. Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J. Statistical and functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 12275–12294.

11. Sojka J.J., Rasmussen C.E., Schunk R.W. An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field // J. Geophys. Res. 1986. V. 91, N A10. P. 11281–11290.

12. Куркин В.И., Орлов А.И., Орлов И.И. Схема расчета характеристик импульсного декаметрового радиосигнала на основе численного суммирования нормальных волн // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1986. Вып. 75. С. 159–164.

13. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919–952.

14. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 24–31.

15. Грозов В.П., Киселев А.М., Котович Г.В., Михайлов С.Я., Пономарчук С.Н. Программное обеспечение обработки и интерпретации ионограмм зондирования на базе цифрового ЛЧМ-ионозонда // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 75–85.

16. Куркин В.И., Носов В.Е., Пономарчук С.Н., Савков С.С., Чистякова Л.В. Метод оперативной диагностики КВ-радиоканала // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1993. Вып. 100. С. 168–188.

3.3. Исследование динамических процессов в магнитосфере и высокоширотной ионосфере Земли методом обратного рассеяния радиоволн коротковолнового диапазона

3.3.1. Разработаны программные комплексы и методы анализа данных радаров SuperDARN, учитывающие особенности распространения сигнала, для калибровки радара и для анализа характеристик фоновой ионосферы

Разработан автоматизированный программный комплекс для определения характеристик ПИВ и их возможных источников по данным ВНЗ на радарах SuperDARN [1–2]. Использована ранее развитая методика, в рамках которой в заданный момент времени наблюдений методом кросскорреляционного анализа в приближении плоского волнового фронта рассчитываются задержки между вариациями на разных лучах радара и координаты отражающих областей. Далее составляется невязка между измеренными и теоретическими задержками, соответствующими заданной аналитической модели возмущения. Составленная невязка минимизируется методом Левенберга–Марквардта относительно азимута и кажущейся горизонтальной скорости возмущения. Расчеты проводятся в цикле по временным отсчетам. В результате для заданных суток получается временная зависимость азимута, кажущейся горизонтальной скорости и других параметров возмущений.

Для автоматизации выделения вариаций минимального группового пути из данных наблюдений, а также коррекции влияния регулярных градиентов ионосферных параметров в комплексе используется модель суточно-сезонных вариаций минимального группового пути сигнала ВНЗ (первоначально для радара SuperDARN Hokkaido East), построенная на основе результатов численного моделирования. Комплекс может использоваться также для определения параметров возмущений по данным НЗ.

На основе вышеописанной методики был разработан автоматизированный программный комплекс для восстановления параметров ПИВ из данных радаров SuperDARN и произведена обработка данных радаров Екатеринбург (ЕКВ, за 2013 г.) и Хоккайдо (с 2006 по 2013 г.). Задержки между вариациями на разных лучах определялись на основе кросскорреляционного анализа.

Анализ распределений волновых параметров среднемасштабных ПИВ — кажущейся горизонтальной скорости, периода и длины волны, приведенных на рис. 96, показал отсутствие явной суточной и сезонной зависимости. Наиболее вероятная скорость 130 м/с и 110 м/с для радаров Хоккайдо и ЕКВ соответственно. Период анализируемых ПИВ от 60 до 100 мин. Горизонтальные длины волн 400–850 км и 200–750 км для радаров Хоккайдо и ЕКВ соответственно.

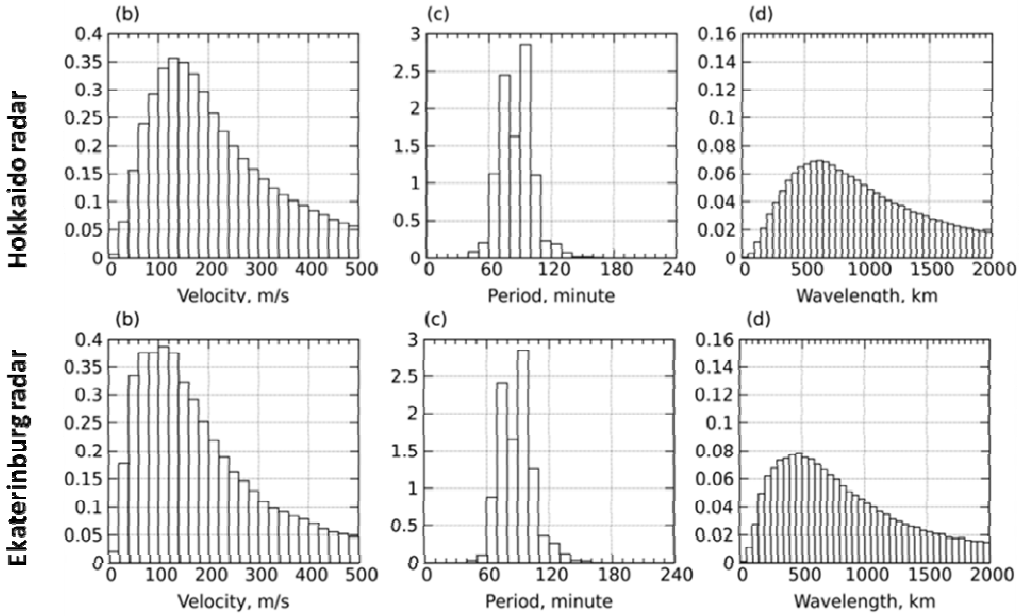


Рис. 96. Распределение частоты наблюдения кажущейся горизонтальной скорости, периода и длины волны среднемасштабных ПИВ для всего периода наблюдений: вверху — по данным радара Хоккайдо, внизу — по данным радара ЕКВ в п. Арти

На рис. 97 вверху показано распределение частоты наблюдения азимута среднемасштабных ПИВ по данным радара SuperDARN Hokkaido East в зависимости от времени суток (LT=UT+9) и сезона года (зима — ноябрь–февраль; лето — май–август; равноденствие — март, апрель, сентябрь, октябрь). Частота наблюдения показана оттенками серого (чем темнее цвет, тем выше частота появления).

Имеется четыре превалирующих направления распространения ПИВ, которые проявляются по-разному в разное время суток (показаны красными стрелками):

- в дневное время превалирует юго-восточное направление (~120°);
- в ночное время — юго-западное (~210°);
- на рассвете — северо-восточное (~35°);
- на закате — северо-западное (290°).

В разные сезоны года частота появления ПИВ для указанных превалирующих направлений также различается:

1. Дневные юго-восточные ПИВ более характерны для зимних месяцев.
2. Рассветные и ночные ПИВ — для лета и сезона равноденствия.
3. В зимнее время отсутствие рассветных и ночных ПИВ в статистике объясняется тем, что в эти времена суток, как правило, отсутствует регулярный сигнал ВНЗ.
4. Летом в течение всего дня статистика показывает северо-западное направление, что, вероятнее всего, связано с недостатками обработки данных. Дело в том, что в летнее дневное время присутствует сильный E-слой, а в годы низкой солнечной активностью и F1-слой, которые могут затенять отражение от F2-слоя. Сейчас проводится работа по более аккуратному разделению сигналов от разных слоев ионосферы.

Аналогичные распределения, рассчитанные для радара ЕКВ для 2013 г. (LT=UT+4), показаны на рис. 97 внизу. Зелеными стрелками показаны положения центра «темных пятен» для радара Хоккайдо. Как хорошо видно из рисунка, имеется заметное сходство распределений для обоих радаров. Но есть и различия:

- имеется сдвижка по времени примерно на 1 ч, которая, скорее всего, связана с тем, что зона регистрации радара Хоккайдо находится в следующем часовом поясе относительно японского локального времени, т. е. более правильно будет сдвинуть временную шкалу для Хоккайдо на один час влево (LT=UT+10).
- есть также некоторая сдвижка по азимутам, особенно отчетливо проявляющаяся в дневное время.

Среди серьезных различий между распределениями для двух радаров можно также отметить отсутствие северо-западного «пятна» летом в дневное время, что связано с меньшей конкуренцией сигналов ВНЗ, отражающихся от F2- и E-слоев для радара ЕКВ.

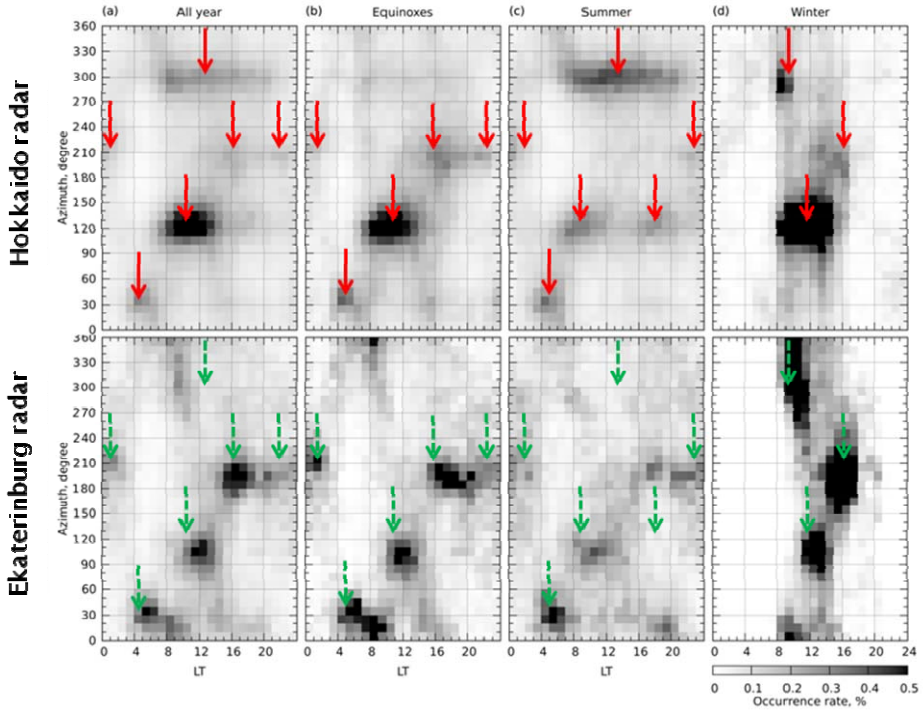


Рис. 97. Распределение частоты наблюдения азимутов среднемасштабных ПИВ в зависимости от времени суток и сезона года: вверху — по данным радара Хоккайдо, внизу — по данным радара ЕКВ

Публикации:

Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. id-8. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8. http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=T2G5hjeqFGDJEhJY183&page=1&doc=2.

3.3.2. Введен непрерывный 30-секундный индекс квазивертикальных вариаций TEC (Wtec)

Падение метеорита «Челябинск» 03:20 UT 15.02.2013, сопровождавшееся большим количеством ионосферных, атмосферных и сейсмических явлений, будет исследоваться еще достаточно долгое время [3].

Для верификации азимутальной зависимости нами был введен непрерывный 30-секундный индекс квазивертикальных вариаций TEC (W_{tec}) по данным одиночной двухчастотной приемной станции GPS/ГЛОНАСС [4].

Методика базируется на оригинальном удалении тренда из данных GPS с помощью разложения по обратным степеням синуса угла места, что соответствует удалению влияния сферически-слоистой ионосферы, и на последующем приведении наклонных вариаций полного электронного содержания к вертикальным.

Публикации:

1. Voeykov S.V., Berngardt O.I.; Shestakov N.V. Use of the index of TEC vertical variation disturbance in studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 2. P. 219–228. DOI: 10.1134/S0016793216020122. http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=T2G5hjeqFGDJEhJY183&page=1&doc=1.

3.3.3. Создана реализация алгоритма расчета зон рассеяния сигнала радаров SuperDARN на ориентированных неоднородностях ионосферы

На основе полученного нами радиолокационного уравнения в рефрагирующей ионосфере создана предварительная версия программного комплекса для расчетов эффектов распространения радиоволн в двух- и однопозиционной задаче [6]. С его помощью проведено моделирование полученного в этом году радиолокационного уравнения, в частности, подтверждено существование области двухпозиционного рассеяния при моностатическом зондировании, оценены характеристики ослабления рассеянного сигнала, связанные с изменением волнового числа зондирующей волны на длине зондирующего импульса, оценены области применимости полученных радиолокационных уравнений.

Публикации:

Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN scalar radar equations // arXiv:1605.01906. https://arxiv.org/abs/1605.01906.

Список использованных источников:

1. Ойнац А.В., Куркин В.И., Nishitani N., Сайто А. Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным радаров SuperDARN // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18, № 8. С. 30–39.

2. Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data // Earth, planets and Space. 2016. V. 68, id-8. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8. http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=T2G5hjeqFGDJEhJY183&page=1&doc=2.

3. Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А., Михалев А.В., Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматулин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение челябинского метеороида // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452, № 2. С. 205–207.

4. Voeykov S.V., Berngardt O.I., Shestakov N.V. Use of the index of TEC vertical variation disturbance in studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 2. P. 219–228. DOI: 10.1134/S0016793216020122. http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=T2G5hjeqFGDJEhJY183&page=1&doc=1.

5. Бернгардт О.И., Кутелев К.А., Куркин В.И., Гркович К.В., Ямпольский Ю.М., Кащеев А.С., Кащеев С.Б., Галушко В.Г., Григорьева С.А., Кусонский О.А. Двухпозиционная локация высокоширотных ионосферных неоднородностей с использованием декаметрового радара ЕКВ и радиотелескопа УТР-2: первые результаты // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 6. С. 433–453. http://elibrary.ru/item.asp?id=24003269.

6. Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN scalar radar equations // arXiv:1605.01906. https://arxiv.org/abs/1605.01906.

3.4. Создание сегмента мониторинга уровня ионосферных помех в Азиатском регионе России, связанных с естественными неоднородностями полярной ионосферы

3.4.1. Радары ИСЗФ СО РАН и геометрия эксперимента

Геометрия эксперимента по совместному наблюдению радиоавроры на радарах ИСЗФ СО РАН 08.06.2015 приведена на рис. 98, *а*. Секторами показаны приближенные секторы обзоров Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) и радара ЕКВ, цифрами показаны номера лучей диаграммы направленности (ДН) радара ЕКВ. Сектор обзора ИРНР приведен для нижних лепестков ДН (на которых возможно наблюдение радиоавроры). Радиоаврора в основном лепестке ДН ИРНР не наблюдается из-за невыполнения условий ракурсности для вертикальных траекторий зондирования.

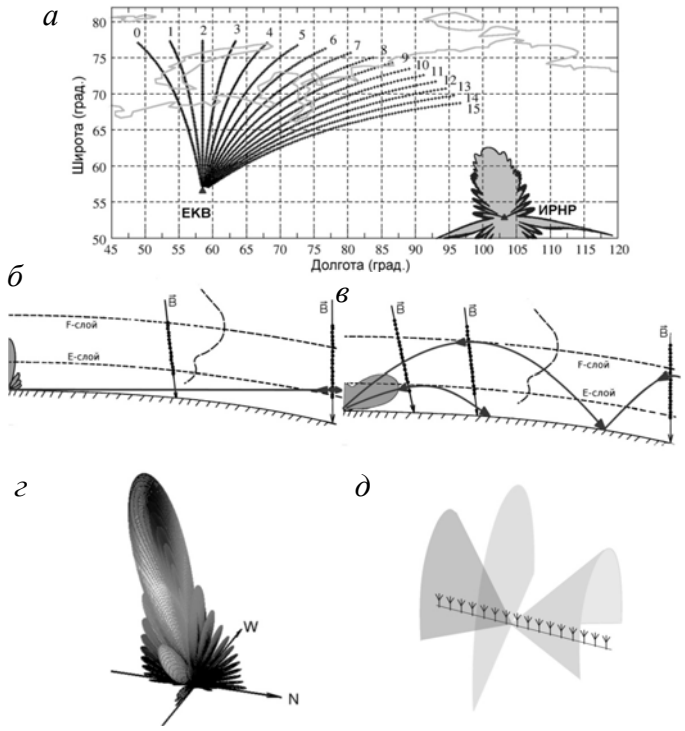


Рис. 98. Геометрия эксперимента и приблизительные диаграммы направленности антенн радаров (на нулевом угле места) (*а*). Геометрия наблюдения когерентного эха: на УКВ-радаре НР ИСЗФ СО РАН (*б*); на КВ-радаре ЕКВ ИСЗФ СО РАН (*в*). Геометрия диаграммы направленности: ИРНР (*г*); радара ЕКВ на различных азимутах (*д*)

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР, 52.8° N, 103.2° E) является единственной в России установкой, созданной на базе оборудования радиолокационной станции (РЛС) «Днепр» [9, 10]. ИРНР представляет собой моностатическую импульсную РЛС с частотным сканированием. Пиковая мощность, достигаемая на двух передатчиках, 3.2 МВт, частота следования зондирующих импульсов ~25 Гц. Длительность зондирующего импульса от 70 до 900 мкс. Диапазон рабочих частот радара 154–162 МГц. Коэффициент усиления антенны около 35 дБ.

Приемопередающая антенна ИРНР представляет собой рупор с размерами апертуры 246×12.2 м, разделенный вдоль перегородкой на два симметричных полурупора, каждый из которых имеет свои независимые фидерные системы и приемопередающие системы, что позволяет использовать эту антенну как две независимые антенны и проводить интерференционные измерения на радаре (рис. 98, *г*).

Каждый из полурупоров обеспечивает ширину диаграммы направленности (ДН) вдоль большой оси около 0.5°. Ребристая замедляющая структура меняет фазовую скорость волны при изменении рабочей частоты, обеспечивая тем самым частотное сканирование ДН в диапазоне до ±30° (рис. 99, *а*). В поперечной плоскости (вдоль короткой оси антенны) ДН каждой из двух независимых секций антенной системы имеет ширину ~20° (рис. 99, *в*). Суммарная ДН радара формируется путем сложения ДН двух полурупоров. Управление формой ДН во время излучения может осуществляться путем изменения разности фаз возбуждающих сигналов в полурупорах. Для определения координат объекта в поперечной плоскости применяется фазовый метод, основанный на измерении разности фаз эхо-сигналов, принятых двумя полурупорами («каналами») антенной системы. В диапазоне углов ±11° разность фаз линейно меняется с антенным азимутом цели, что позволяет определять этот угол с точностью порядка 10′ (рис. 99, *д*). Антенна имеет поляризационный фильтр, подавляющий на 30 дБ поперечную к большой оси рупора компоненту электрического поля. Таким образом, в основном лепестке ДН излучаются и принимаются сигналы строго линейной поляризации.

Первые наблюдения радиоавроры на ИРНР были проведены в 1998 г. [7, 11]. В результате проведенного анализа было показано, как можно использовать достаточно сложную геометрию ДН радара для восстановления характеристик слоя с неоднородностями [12]. Статистический анализ показал, что основное рассеяние наблюдается на высотах Е-слоя к северу от радара, а угловая (ракурсная) чувствительность составляет порядка 10–20 дБ на градус [12]. Логарифм интенсивности радиоавроры пропорционален току (или электрическому полю) в области рассеяния, что согласуется с данными других исследователей [13]. Диапазон углов, в котором наблюдается радиоаврора, обычно соответствует лучам, которые перпендикулярны силовым линиям магнитного поля на высоте Е-слоя, и дальностям порядка 500–1200 км к северу от радара [7]. Геометрия наблюдений представлена на рис. 98, *б*.

Когерентный радар ИСФЗ СО РАН (EKB, 56.5° N, 58.5° E) на сегодняшний момент является единственным научным импульсным загоризонтным декаметровым радаром в РФ. Радар EKB был приобретен и установлен Институтом солнечно-земной физики СО РАН в 180 км к юго-западу от Екатеринбурга на территории обс. «Арти» Института геофизики УрО РАН (56.43° N, 58.56° E, Свердловская область, Россия) в 2012 г. Приемопередающая аппаратура радара, созданная в Университете Лейстера при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН, представляет собой аналог стереорадара CUTLASS сети SuperDARN и использует стандартное программное обеспечение радаров SuperDARN для обработки данных зондирования.

Радар работает в частотном диапазоне 8–20 МГц со средней мощностью порядка 600 Вт, пиковой мощностью порядка 10 КВт и длительностью элементарных зондирующих импульсов 100–300 мкс. Диаграмма направленности радара на излучение формируется 16 эквидистантными антеннами, расположенными в линейной фазированной решетке и излучающими зондирующий сигнал с фиксированной (заданной) фазовой разницей между соседними антеннами. Это позволяет сканировать сектор обзора радара выбором величины этой разницы. Угловое разрешение радара по азимуту составляет 3–6° в зависимости от частоты, в угломестном направлении ДН почти изотропна (рис. 98, *д*).

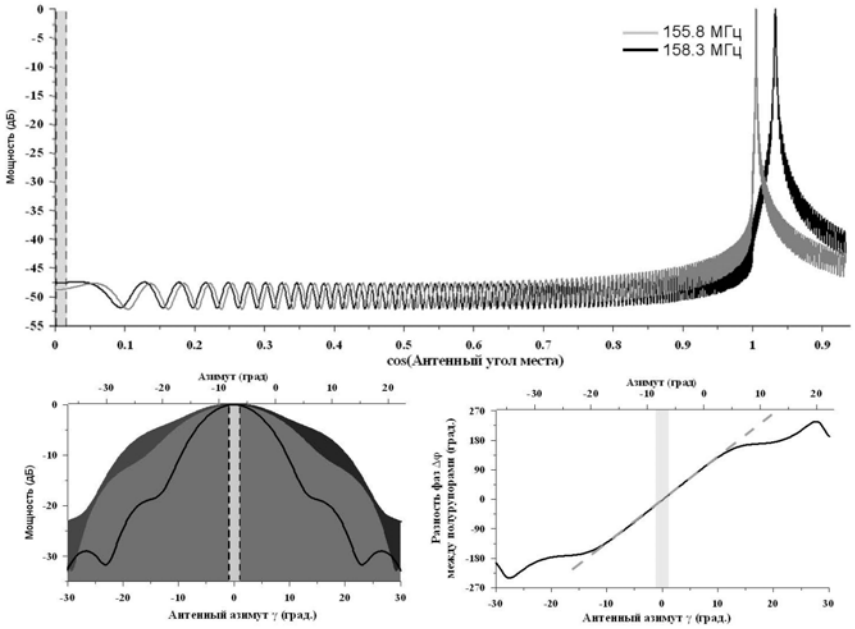


Рис. 99. Модели диаграмм направленности в плоскости частотного сканирования (угломестное направление), соответствующие рабочим частотам 158.3 МГц (черная линия) и 155.8 МГц (серая линия), как функций косинуса угла места (*а*). Амплитудные диаграммы направленности полурупоров. Сплошная линия — полная диаграмма направленности при синфазном сложении сигнала (*б*). Модель фазо-азимутальной характеристики ДН антенны ИРНР (*в*): штрихи — приближение линейности фазо-азимутальной характеристики; светло-серая прямоугольная область на рисунках — область наблюдения радиоавроры

В штатном режиме радары SuperDARN излучают сигнал специальной формы [14], формируемый последовательным излучением идентичных мультиимпульсных последовательностей, каждая из которых состоит из семи или восьми одиночных импульсов с одинаковыми длинами и амплитудами. Как правило, при работе радара излучаются зондирующие импульсы длительностью 300 мкс, что позволяет получить разрешение по дальности 45 км. Для обработки принятого сигнала применяется автокорреляционный анализ с усреднением по 40–80 сеансам зондирования. Таким образом, длительность полного цикла анализа одного направления, когда ориентация антенной системы радара зафиксирована на определенном азимуте, обычно составляет около 4–8 с [6]. После этого радар, как правило, переключается на другой азимут. Обычно параметры рассеянного сигнала оцениваются вычислением характеристик автокорреляционной функции в предположении об ее гауссовой или экспоненциальной форме. По фазовой структуре определяются доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала и радиальная составляющая скорости дрейфа неоднородностей, а по форме автокорреляционной функции — амплитуда сигнала и его спектральная ширина [6].

С начала запуска в 2012 г. радар круглосуточно работает ~97 % времени с временным разрешением 2 мин и пространственным разрешением 45 км. Это позволяет проводить круглосуточный мониторинг радиоавроры, определять ее статистические характеристики и проводить анализ ее взаимосвязи с космической погодой [8]. Основным отличием радара EKB от подобных радаров SuperDARN является его работа иными последовательностями [14], расширенный диапазон по дальностям и отсутствие интерференционной решетки для измерений углов прихода.

В связи с особенностями распространения сигнала, радиоаврора на радаре EKB может наблюдаться в широком диапазоне дальностей и направлений (рис. 98, *в*), что упрощает задачу мониторинга самих неоднородностей, но усложняет задачу определения их параметров по данным радиозондирования, в существенной степени зависящим от характеристик фоновой ионосферы [15, 16, 17].

Таким образом, возможность совместных наблюдений EKB–ИРНР ограничена сложностью регистрации радиоавроры на ИРНР, вызванной следующими причинами.

Первой причиной является в среднеширотность ИРНР, что дает возможность наблюдать радиоаврору только во время сильных геомагнитных возмущений, когда высокоширотные неоднородности сдвигаются существенно экваториальнее.

Второй причиной является приблизительно вертикальная направленность основного лепестка ДН ИРНР, дающая возможность наблюдения радиоавроры только на нижних боковых лепестках, с существенным ослаблением [7, 12, 11].

Третья причина — сильная частотная зависимость диаграммы направленности ИРНР, как следствие, сложность подбора частоты радара для устойчивого наблюдения когерентного эха, очень чувствительного к направлению луча зрения радара.

Для исследования возможностей совместной работы комплекса была проведена серия совместных экспериментов по регистрации когерентного эха на ИРНР, самым удачным из которых оказался эксперимент 8 июня 2015 г.

На рис. 99, *а* видно, что существует область пространства, где секторы обзоров радаров близки. Это особенно хорошо видно в районе лучей 13–15 EKB, что позволяет поставить задачу анализа характеристик ионосферных неоднородностей в близкой области пространства в КВ- и УКВ-диапазонах одновременно.

3.4.2. Совместные наблюдения радиоэха в КВ- и УКВ-диапазонах 8 июня 2015 г.

На рис. 100 представлены результаты наблюдений радиоавроры в 11:30–14:09 UT на радаре EKB — мощность рассеянного сигнала (рис. 100, A1-J1) и доплеровская скорость неоднородностей (рис. 100, A2-J2) как функции географической широты и долготы, а также времени. Рисунки выполнены схематично, без калибровки ДН радаров и учета про-

цесса распространения радиосигнала в неоднородной ионосфере, в предположении распространения вдоль дуги большого круга. Поэтому реальные географические координаты несколько отличаются от приведенных на рисунке.

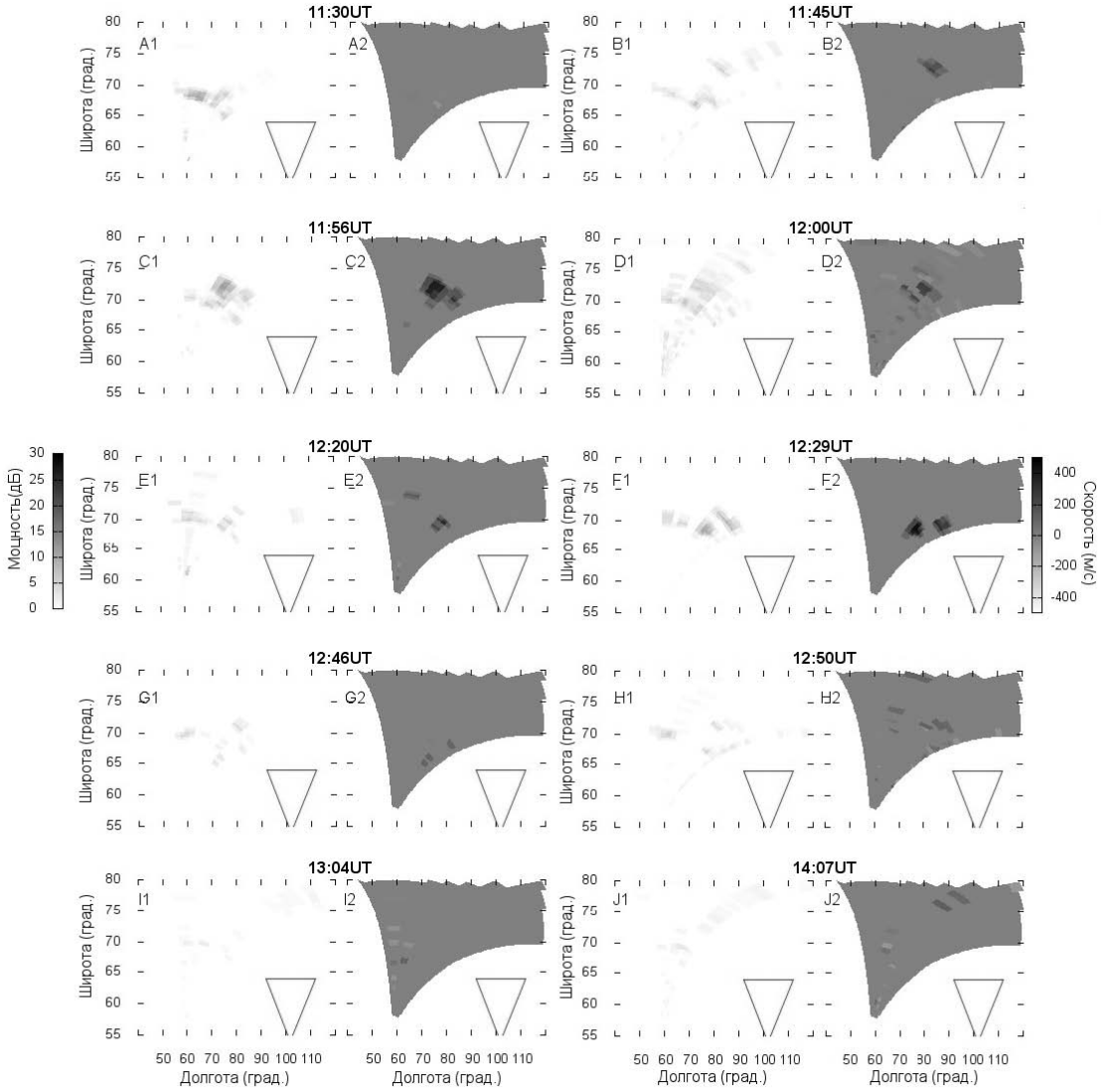


Рис. 100. Результаты наблюдений радиоавроры на радаре EKB 08.06.2015. Рисунки с цифрой 1 соответствуют мощности рассеянного сигнала в секторе обзора радара, а рисунки с цифрой 2 — доплеровской скорости неоднородностей. Треугольником обозначена примерная диаграмма направленности ИРНР (нижние лепестки)

Из рис. 100 видно, что интенсивная радиоаврора, характеризующаяся высокой мощностью и высокими доплеровскими скоростями, появляется в 11:45 UT в виде относительно малой локализованной области и дрейфует в экваториальном направлении. Как будет показано далее, доплеровские скорости неоднородностей достигают 700 м/с и характерны для радиоавроры высот F-слоя в существенно возмущенных условиях.

Во время эксперимента индекс K_p достигал 6, а индекс Dst<–70 (рис. 101, A), что характеризует этот период как геомагнитную бурю. На рис. 101 представлены поведение индекса *Dst* 07–09.06.2015 и результаты наблюдений радиоавроры на обоих радарах.

На рис. 101, B–D показано поведение основных параметров, получаемых на радаре EKB, безотносительно к направлению зондирования. На рисунке представлены мощность рассеянного сигнала (рис. 101, B) и доплеровская скорость рассеивающих неоднородностей (рис. 101, C) как функция географической широты.

Динамика скорости неоднородностей более четко выражена на рис. 101, D, на котором

она приведена как функция времени, независимо от широты и долготы рассеивающей области.

На рис. 101, E показано поведение мощности рассеянного сигнала по данным ИРНР. На рис. 101, E видно несколько областей рассеяния. Нижний диапазон дальностей 200–600 км соответствует некогерентно рассеянному сигналу, полученному в основном лепестке ДН радара, и в грубом приближении дальность соответствует высоте точки рассеяния над радаром. Полосы связаны с фарадеевскими замираниями сигнала, вызванными поляризационными характеристиками антенны и распространением зондирующего сигнала в анизотропной (замагниченной) ионосферной плазме. Область рассеяния на дальностях 1000–1200 км в период 11:40–15:30 UT соответствует рассеянию на неоднородностях E-слоя ионосферы, вытянутых вдоль магнитного поля Земли и наблюдаемых на нижних лепестках ДН антенны [7, 12]. В этом случае дальность приблизительно соответствует дальности до области рассеяния на север от радара, в почти северном направлении.

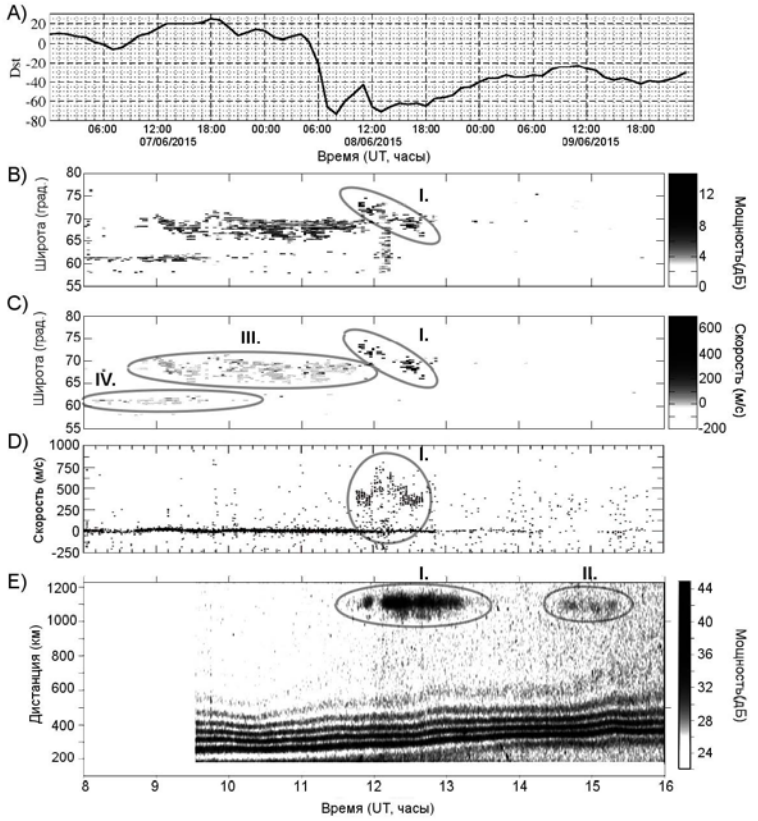


Рис. 101. Поведение *Dst* 7–09.06.2015 (по данным WDC Kyoto [http:// wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/]) (*a*). Результаты наблюдений на радаре EKB: мощность рассеянного сигнала (B); доплеровское смещение частоты (в единицах эквивалентной скорости) как функция широты рассеяния и времени (C) и как функция времени (D). Мощность рассеянного сигнала радара ИРНР (E): I, II, IV — зоны радиоавроры, III — область сигналов возвратно-наклонного зондирования

По результатам наблюдений на радаре EKB (рис. 101, B–D) можно выделить несколько областей: во-первых, область высоких скоростей (обозначена на рис. 101 как зона I), связанных с высокими значениями электрического поля в 11:00–13:00 UT. Почти одновременно наблюдалось когерентное эхо на ИРНР. Область IV — это область рассеяния на относительно малых дальностях (60–65°) в 08:00–10:00 UT, не сопровождавшегося ни высокими скоростями, ни проявлениями когерентного эха на радаре НР. Узкая область рассеяния, низкая скорость и малая дальность позволяют предположить, что возможным механизмом рассеяния в области являлось рассеяние в E-слое.

Зона III — сигнал возвратно-наклонного зондирования, характеризующийся также низкими скоростями и связанный с рассеянием рефрагирующего в ионосфере сигнала от

поверхности Земли.

Кроме того в данных ИРНР можно выделить зону II — интервал 14:30–15:20 UT, когда наблюдалось когерентное эхо, отчетливо не наблюдавшееся на радаре EKB.

В данном случае проводится детальный анализ зоны I (11:00–13:00 UT) как наиболее ярко выраженного и мощного явления во время эксперимента.

Представление в виде пространственно-временного распределения интенсивности и скорости сложно для сравнительного анализа данных радара НР, поэтому для сравнительного анализа с данными ИРНР исследовались характеристики весовой функции

$$S(\varphi, \Theta, t) = \left|V_d(\varphi, \Theta, t)\right| P_l(\varphi, \Theta, t), \tag{8}$$

где $V_d(\varphi, \Theta, t)$ — доплеровское смещение скорости, $P_l(\varphi, \Theta, t)$ — мощность рассеянного сигнала в дБ.

Введение такой функции связано с тем, что скорость неоднородностей в F-слое пропорциональна напряженности электрического поля [6], в то время как в E-слое электрическому полю пропорционален логарифм мощности, по крайней мере в УКВ-диапазоне [13]. Поэтому функция S отражает интенсивность электрического поля в нескольких моделях рассеяния.

На рис. 102 представлены статистические характеристики функций $S(\varphi, \Theta, t)$ — динамика средних моментов как функция широты φ и долготы Θ:

энергия весовой функции $E(t) = \int S(\varphi, \Theta, t) d\varphi d\Theta$;

плотность энергии весовой функции $e(t) = \dfrac{\int S(\varphi, \Theta, t) d\varphi d\Theta}{\int \left(S(\varphi, \Theta, t) > 0 ? 1 : 0\right) d\varphi d\Theta}$;

средняя широта $M_\varphi(t) = \int S(\varphi, \Theta, t) d\varphi d\Theta$;

средняя долгота $M_\Theta(t) = \dfrac{\int \Theta S(\varphi, \Theta, t) d\varphi d\Theta}{E(t)}$;

размер области по широте $\sigma_\varphi(t) = \sqrt{\dfrac{\int \left(\varphi - M_\varphi(t)\right)^2 S(\varphi, \Theta, t) d\varphi d\Theta}{E(t)}}$;

размер области по долготе $\sigma_\Theta(t) = \sqrt{\dfrac{\int \left(\Theta - M_\Theta(t)\right)^2 S(\varphi, \Theta, t) d\varphi d\Theta}{E(t)}}$.

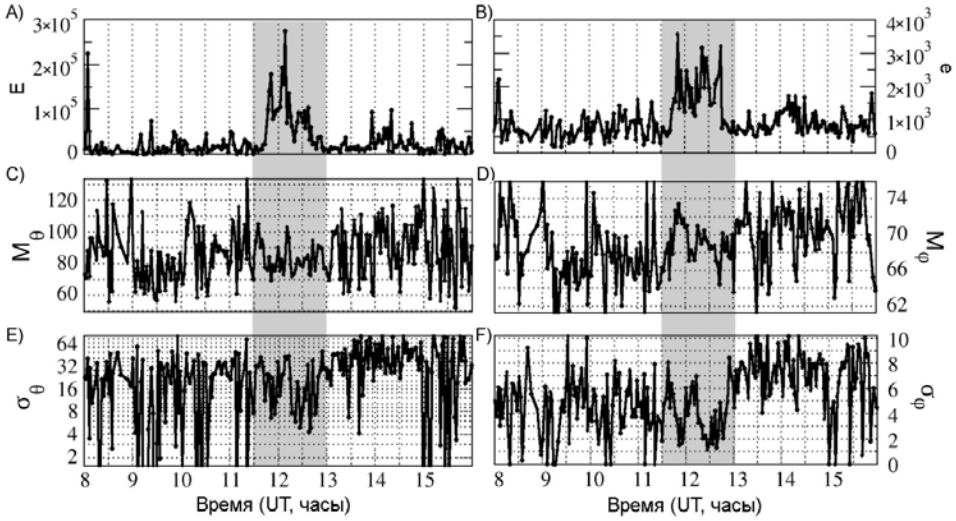


Рис. 102. Динамика характерного положения (C–D) и размера (E–F) области рассеянного сигнала (до калибровки). Интуитивный индекс интенсивности рассеяния — произведение мощности рассеянного сигнала (дБ) на модуль доплеровской скорости (м/с): B — средний по области высоких скоростей (>50 м/с) и амплитуд(>0 дБ); A — суммарный по этой области. Серым цветом выделена область исследуемой радиоавроры

Из рис. 102, A–B видно, что область интенсивного рассеянного сигнала (серая область) соответствует интервалу 11:45–12:45 UT, именно в это время существуют нерегулярные области, в которых одновременно наблюдаются высокая мощность рассеянного сигнала и высокие абсолютные скорости, что говорит о мощном рассеянии на магнитоориентированных неоднородностях. Из рис. 102, C–D видно, что область интенсивного рассеянного сигнала сосредоточена вблизи 80° E и медленно перемещается по широте от 74 до 67° N. Размер этой области (рис. 102, E–F) составляет от 6 до 2° по широте и от 40 до 4° по долготе.

3.4.3. Калибровка радаров КВ и УКВ в эксперименте

3.4.3.1. Источники ошибок географической привязки данных радаров

Существенной при оценке геометрии наблюдения рассеяния является географическая привязка данных. Для обоих радаров сложно осуществить привязку данных эксперимента к конкретной зоне пространства.

На радаре EKB основным источником ошибок является рефракция КВ-радиоволн в ионосфере, приводящая к существенной разнице между геометрической длиной траектории и групповой задержкой сигнала. Форма траектории распространения сигнала, зависящая от распределения электронной концентрации, также ухудшает точность интерпретации и географической привязки. Кроме того, структура фазированной антенной решетки радара (рис. 98, *г*) такова, что азимут луча зависит от угла места луча, что вносит дополнительные ошибки по азимуту, связанные с рефракцией.

На ИРНР основным источником ошибок является широкая по азимуту диаграмма направленности, не дающая точно определить азимут направления волны. Поскольку формирование ДН в азимутальном направлении осуществляется с помощью механической конструкции (линейной решетки щелевых излучателей и замедляющей системы в виде открытой ребристой структуры), то температурное расширение этой конструкции приводит к уходу углочастотной характеристики (около 0.5–0.75 угл. мин 1 °C). Небольшое различие в температурной зависимости каналов приводит к независимому смещению фазовых ДН, которое может медленно меняться в течение суток.

3.4.3.2. Географическая калибровка данных ИРНР

В зависимости от характера извлечения угловой информации о цели из принимаемых сигналов различают три основных способа определения координат в моноимпульсных системах: амплитудный, фазовый и комплексный [18].

Для определения азимута на рассеивающие неоднородности на ИРНР использовался фазоразностный метод с калибровкой по космическим источникам. В основе метода лежит определение направления на цель вводной координатной плоскости сравнением фаз сигналов, принимаемых двумя антеннами. Для работы метода необходимо знание амплитудной и фазовой ДН радара. В работе использовалась расчетная диаграмма направленности, в области основного лепестка многократно откалиброванная по данным наблюдений космических объектов [19].

На рис. 99, A приведены сечения ДН в плоскости сканирования для рабочих частот, использовавшихся в наблюдениях 8 июня 2016 г., а также отмечен диапазон углов, в котором наблюдалось когерентное эхо (КЭ). На рис. 99, B приведена ДН в поперечном сечении отдельно для каждого полурупора антенны. Расчетная фазоазимутальная диаграмма, позволяющая связать наблюдаемую разницу фаз на полурупорах с азимутальным направлением, приведена на рис. 99, C.

Для расчета профилей мощности рассеянного сигнала и разности фаз между каналами в измерениях на ИРНР использовался 5-элементный код Баркера длительностью 200 мкс.

Основным методом, применяемым для анализа угловых характеристик рассеянного сигнала, является комплексная функция когерентности, или коэффициент межантенной корреляции η(КК). Для вычисления η используются сигналы с обоих каналов антенны ИРНР:

$$\eta = \frac{\langle U_1 U_2 \rangle}{\sqrt{\langle |U_1|^2 \rangle \langle |U_2|^2 \rangle}}, \tag{9}$$

где $U_{1,2}$ — сигналы с первого и второго полурупоров (каналов) антенны ИРНР.

Коэффициент корреляции рассчитывается для каждой задержки/дальности путем усреднения по ряду сеансов зондирования (100–200 сеансов), что соответствует временному разрешению 16–32 с. Разность фаз между каналами представляет аргумент коэффициента корреляции:

$$\Delta\varphi = \arg(\eta). \tag{10}$$

Двухканальная антенная система ИРНР работает как две антенны в схеме интерферометра. Разность хода волн, выраженная в электрических градусах, определяется как

$$\Delta\varphi = k_{\Delta\varphi}\gamma, \tag{11}$$

где $k_{\Delta\varphi} \approx 17.3$ — наклон фазоазимутальной характеристики, γ — азимут в антенной системе координат.

Для учета влияния на корреляционную функцию искажений формы сигнала, связанных с возможными временными дрейфами в работе передатчиков, и особенностей распространения сигнала в антенне были проведены калибровочные измерения формы излученного сигнала по наблюдениям за спутниками и получена усредненная амплитудно-фазовая форма излученного сигнала, используемого в процессе измерений (рис. 103, A–B). На рисунке показаны форма радиолокационного сигнала от космического аппарата (черная линия) и построенная на его основе модель излученного импульса (серая линия).

Для учета медленного дрейфа разности фаз полурупоров (дополнительного фазового смещения между полурупорами), вносящего вклад в точность определения азимута, а также для учета космических шумов, вносящих вклад в амплитуду рассеянного сигнала, были проведены калибровочные измерения по известным с хорошей точностью космическим объектам — искусственным спутникам Земли (рис. 103, C) и радиогалактике Лебедь A (рис. 103, D–G, область III).

Калибровка по спутникам позволила выявить и учесть абсолютное значение (дополнительное фазовое смещение порядка 70°) и медленный дрейф разности фаз между полурупорами (порядка нескольких градусов) за время наблюдений когерентного эха (рис. 103, C), а калибровка по радиоисточнику позволила оценить уровень быстрых вариаций фазы и амплитуду космического шума (рис. 3.4.6, D–G).

На рис. 103, C крестиками показано фазовое смещение электрического нуля (дополнительное фазовое смещение) — невязка между измеренной разностью фаз и рассчитанной по элементам орбиты наблюдаемого космического аппарата.

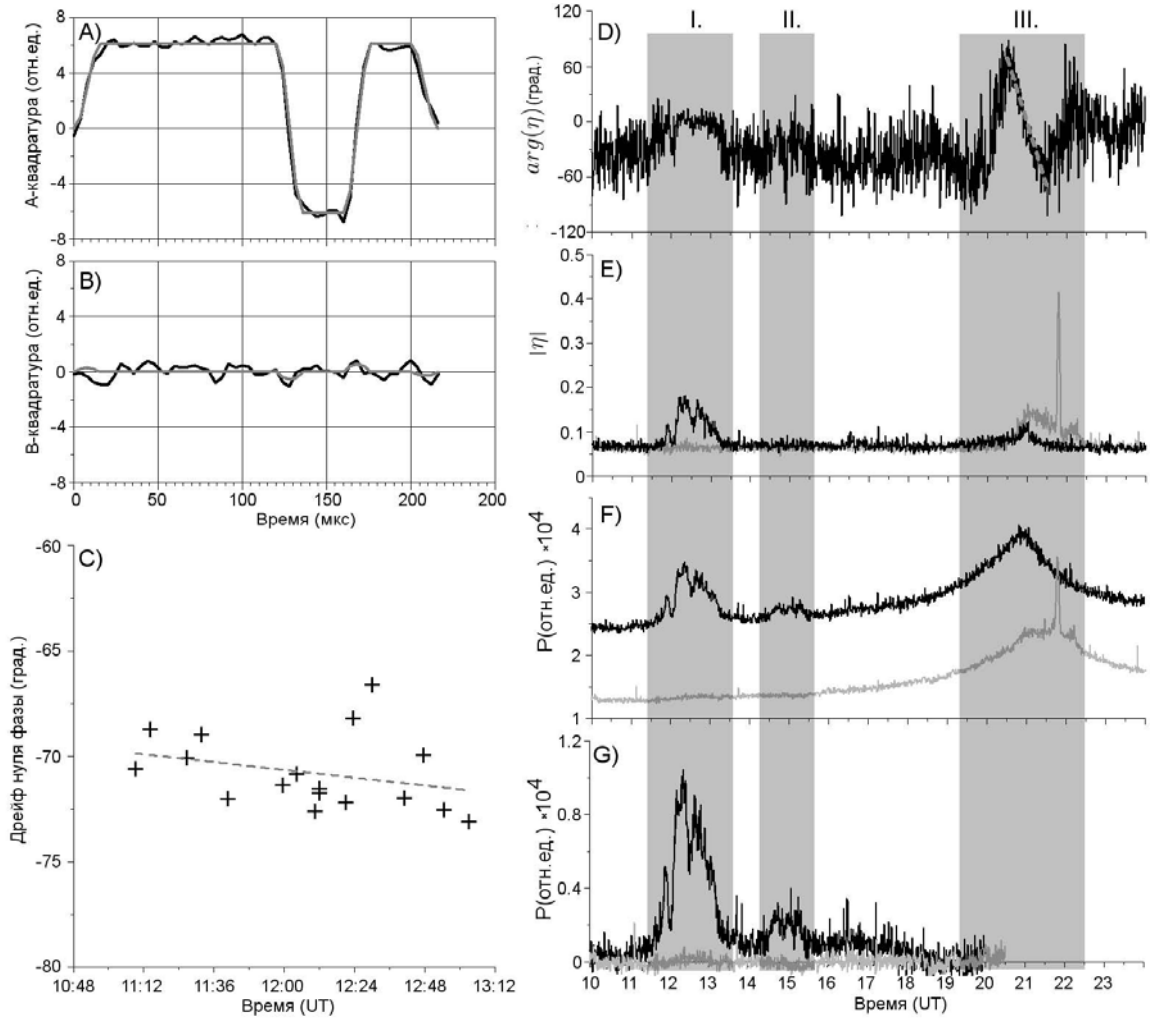


Рис. 103. Квадратурные компоненты излученного сигнала (черная линия — эксперимент, серая линия — аппроксимирующая модель), измеренные по сигналу, отраженному от космического объекта с наибольшим сечением рассеяния (A, B). Дрейф фазового нуля arg(η), определенный по наблюдениям ИРНР каталогизированных космических объектов с хорошо известной траекторией (C). Межрупорная разность фаз arg(η) (D), модуль коэффициента корреляции η (E), мощность (F); мощность, скорректированная на ионосферный шум (G). Серые зоны I, II — ионосферное рассеяние, III — прохождение через диаграмму галактики Лебедь А

На рис. 103, D–G представлены результаты проверки калибровки фазового нуля, выполненной по результатам наблюдения радиогалактики Лебедь А. Для диапазона дальностей 1050–1150 км, на которых наблюдалась радиоаврора, по (3.4.2), (3.4.3) с учетом калибровки фазового нуля (рис. 103, C) рассчитывались разность фаз (рис. 103, D), η (рис. 103, E) и мощность (рис. 103, F). Заметим, что на частоте 155.8 МГц (серая линия на рис. 103, E–F) наблюдения, в отличие от 158.3 МГц (черная линия на рис. 103, E–F), проводились круглые сутки и в динамике мощности четко виден суточный ход, связанный с прохождением галактических радиоисточников через диаграмму направленности ИРНР (область III). На рис. 103, D–F видно, что в 20:00–22:00 UT наблюдается усиление шума, связанное с прохождением через ДН радара Млечного пути, рядом с которым расположена радиогалактика Лебедь А. Радиоисточник Лебедь А имеет угловые размеры несколько угловых минут и по сравнению с диаграммой направленности ИРНР может считаться точечным, что делает его удобным объектом для калибровки. Видно, что тренд измеренной разности фаз (черная линия на рис. 103, D) и расчетная динамика разности фаз для Лебедя А (штриховая линия на рис. 103, D) совпадают, что позволяет использовать данные после коррекции фазового нуля (рис. 103, C) для точных расчетов азимута угла прихода.

Вариации мощности, связанные с когерентным эхом, получаются как результат вы-

читания суточного хода галактических шумов (рис. 103, G). Из рис. 103, G видно, что радиоаврора наблюдалась только на частоте 158.3 МГц, на частоте 155.8 МГц изменения уровня сигнала связаны в основном с космическим шумом, а радиоаврора эффективно не наблюдается. Пока не ясно, чем вызван сильный контраст в мощности в зависимости от рабочей частоты — характеристиками антенны или селективными характеристиками радиоавроры, обладающей сильными ракурсными свойствами.

В результате приведенных выше расчетов нами была проведена полная калибровка антенных трактов и получен временной ход параметров радиоавроры с точностью, максимально допустимой на радаре ИРНР в настоящее время. На рис. 104 представлены результаты обработки сигналов обратного рассеяния для двух различных частот (1 — 155.8 МГц, 2 — 158.3 МГц): мощность сигнала, зарегистрированная соответственно верхним (рис. 104, A1–A3) и нижним (рис. 104, B1–B3) полурупором, модуль (рис. 104, C1–C3) и аргумент коэффициента когерентности (рис. 104, D1–D3) после устранения дрейфа фазового нуля. Представленные результаты получены путем усреднения перечисленных характеристик по ряду сеансов зондирования (100–200 сеансов) для каждой рабочей частоты, что соответствует временному разрешению 16–32 сек.

Рисунки с меткой 3 соответствуют частоте 158.3 МГц и нескольким моментам времени.

Из рисунка видна характерная особенность радара ИРНР — существенная разница в абсолютных мощностях принятого сигнала на верхнем (рис. 104, A) и нижнем (рис. 104, B) полурупорах, связанная с неидентичностью приемных трактов.

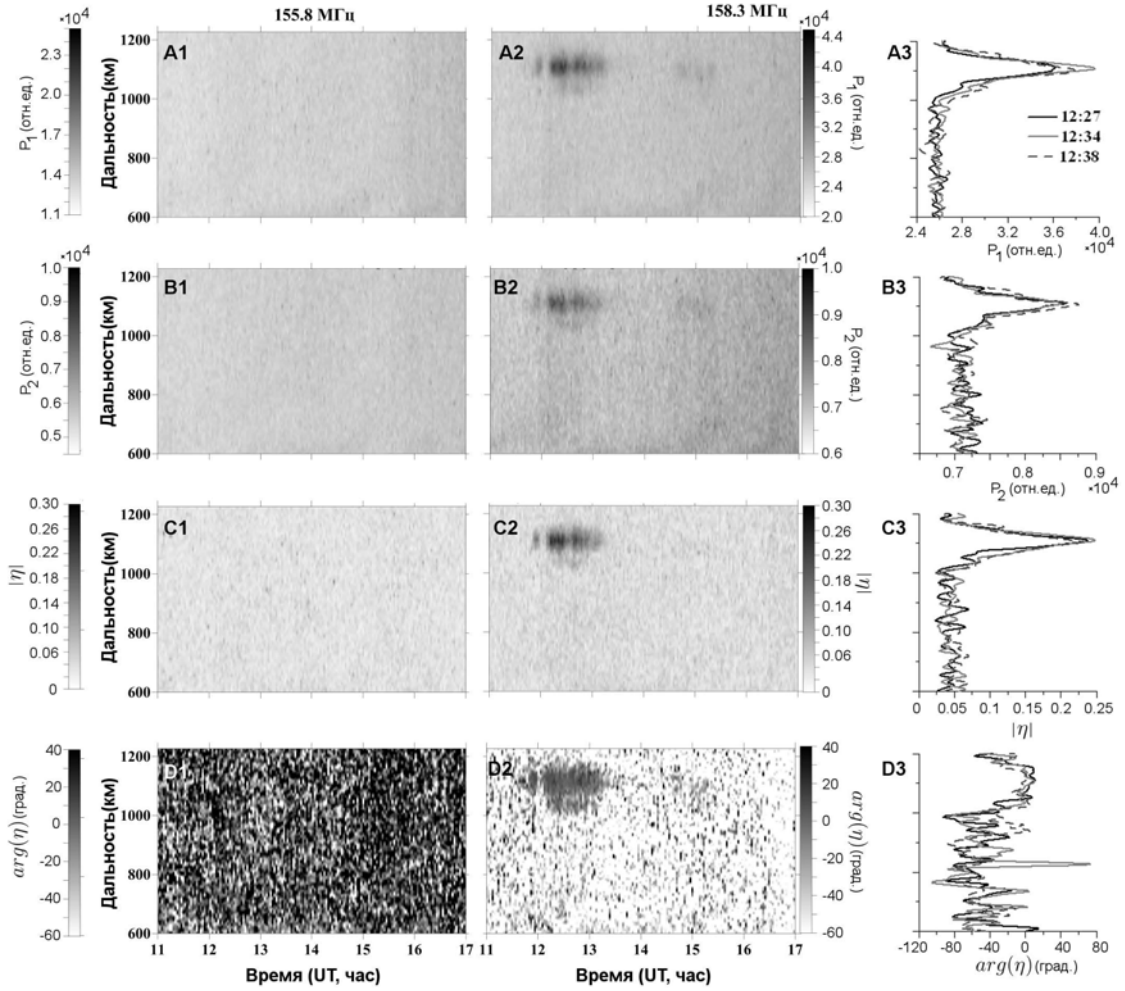


Рис. 104. Результаты обработки ионосферного сигнала: A1–D1 — для частоты 155.8 МГц; A2–D2 — для частоты 158.3 МГц. Сверху вниз: A — мощность сигнала с верхнего полурупора *P*1; B — мощность сигнала с нижнего полурупора *P*2; C — коэффициент межрупорной корреляции η; D — разность фаз между полурупорами arg(η). Крайние правые панели — зависимость соответствующих параметров от высоты для разных моментов времени на частоте 158.3 МГц

Из сравнения рисунков видно, что радиоаврора наблюдается на 158.3 МГц и не наблюдается на 155.8 МГц в течение всего эксперимента, что позволяет предполагать существенное влияние на этот эффект скорее частотно-угловых характеристик антенны, чем среды распространения или характеристик рассеивателей. Этот эффект проявляется и для мощности (рис. 104, B), и для коэффициента корреляции (рис. 104, C). Из-за этого же эффекта разность фаз между полурупорами (и, как следствие, направление на область рассеяния) может быть определена только для частоты 158 МГц (рис. 104, C2).

Отчетливо видны две области радиоавроры: более узкая по дальности и слабая по энергетике на дальности 1050 км и более сильная и растянутая на дальности 1100 км. Детально ход параметров для фиксированных моментов времени показан на рис. 104, A3–C3. Из рис. 104, A3–C3 видно, что первая область существенно (примерно в три раза) меньше второй как по мощности, так и по нормированному коэффициенту корреляции. В то же время разница фаз (следовательно, и азимут на рассеивающую область) примерно одинакова и от дальности не зависит (рис. 104, D3).

3.4.3.3. Географическая калибровка данных радара EKB

Эффективными рассеивателями радиосигнала КВ-диапазона в ионосфере выступают неоднородности ионосферной плазмы, вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Условием рассеяния сигнала на такой неоднородности в направлении радара в случае моностатического обратного рассеяния служит ортогональность волнового вектора электромагнитной волны и силовой линии магнитного поля в точке рассеяния [16]. Радиоволны рабочего диапазона радара EKB испытывают значительную рефракцию в ионосфере, что, с учетом структуры магнитного поля Земли в высокоширотных областях, приводит к существованию протяженных зон эффективного рассеяния сигнала радара. Эти зоны могут быть расположены на любой высоте: в F-слое, E-слое и межслоевой долине (рис. 98, *в*).

Структура антенной решетки приводит к тому, что диаграмма направленности радара имеет вид поверхности конуса, угол при вершине которого традиционно связывается с азимутом излучения (рис. 98, *д*). При относительно высоких углах возвышения, соответствующих многоскачковому распространению и рассеянию в F-слое, необходимо проводить учет указанной зависимости азимута излучения от угла места. Таким образом, для корректной интерпретации результатов измерений необходимо производить географическую привязку зон обратного рассеяния сигнала по азимуту, что можно сделать только с привлечением модели распространения и рассеяния радиосигнала, которая должна включать модель ионосферы и геомагнитного поля.

Из геометрических соображений зависимость азимута выхода луча α с фазированной решетки от угла места β этого луча и угла при вершине конуса α_0, соответствующего азимуту луча при нулевом углу места, описывается формулой

$$\alpha = \arcsin(\sin\alpha_0 / \cos\beta) + \alpha_c , \qquad (12)$$

где α_c – азимут центрального направления обзора. Таким образом, направление излучения луча совпадает с направлением текущего лепестка только при угле места излучения $\beta=0°$.

В плоскости, проходящей через радар, точку рассеяния и направление излучения радиоволны, задача распространения радиоволны может быть сведена к хорошо исследованной двумерной [20]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial R}{\partial \tau} = P_{\mathrm{R}}, \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \dfrac{1}{R} P_{\varphi}, \\ \dfrac{\partial P_{\mathrm{R}}}{\partial \tau} = \dfrac{f_{\mathrm{e}}}{f_0^2} \dfrac{\partial f_{\mathrm{e}}}{\partial R} + \dfrac{1}{R} P_{\varphi}^2, \\ \dfrac{\partial P_{\varphi}}{\partial \tau} = \dfrac{1}{R} \left(\dfrac{f_{\mathrm{e}}}{f_0^2} \dfrac{\partial f_{\mathrm{e}}}{\partial \varphi} - P_{\mathrm{R}} P_{\varphi} \right). \end{cases} \quad (13)$$

где R и φ — полярные координаты, τ — групповой путь луча, f_{e} — плазменная частота в данной точке, f — частота передатчика, P_{R} и P_{φ} — радиальная и угловая компоненты направляющего импульса $\overrightarrow{P_{\mathrm{R}}}$.

При решении задачи диаграмма направленности радара в вертикальной плоскости разбивалась на 106 лучей в диапазоне углов места 0°–45°. Лучи с большими углами места проходили сквозь ионосферу и не представляли интереса в данной работе.

Пространственное распределение плазменной частоты задавалось с помощью международной референтной модели ионосферы IRI [21]. В качестве входного параметра бралась дата проведения эксперимента (08.06.2015). Модельная ионосфера разбивалась по сетке из 104 точек — в конечном наборе точек по высоте (100 точек, шаг 4 км) и по дальности (100 точек вдоль траектории, что примерно соответствует шагу 30 км). При решении задачи распространения интерполяция среды между точками сетки осуществлялась с помощью квадратичных B-сплайнов [22].

Задача Коши для системы характеристических уравнений решалась с помощью явного метода Адамса–Башфорта 3-го порядка [23, 24]. Шаг интегрирования по групповому пути τ составлял 1 км. Частота передатчика f составляла 11 МГц, что примерно соответствует реальной частоте радара в день наблюдений. Магнитное поле Земли рассчитывалось в международной референтной модели геомагнитного поля IGRF-12 [25]. На рис. 105, А приведен пример пространственного распределения угла δ между направлением магнитного поля **B** и волновым вектором **P** для различных углов места выхода луча.

На рис. 105, А представлен пример лучевых траекторий, полученных в результате расчетов (прореженных). Цвет точки луча соответствует углу между **B** и **P** на данном участке траектории. В рамках модели существенной ракурсной чувствительности (см., например, [3, 26]), можно считать, что наиболее эффективно обратное рассеяние происходит при углах $\delta = 90° \pm 2°$. Этим зонам соответствует белый цвет на рис. 105, А.

Модель IRI, являясь усредненной, нуждается в коррекции при использовании под конкретные геофизические и локальные ионосферные условия. Такой механизм коррекции в модели реализован на основе задания максимальной плазменной частоты слоя F2 (f_{o}F2) и/или высоты максимума слоя F2 (h_{m}F2) для каждой дальности вдоль трассы.

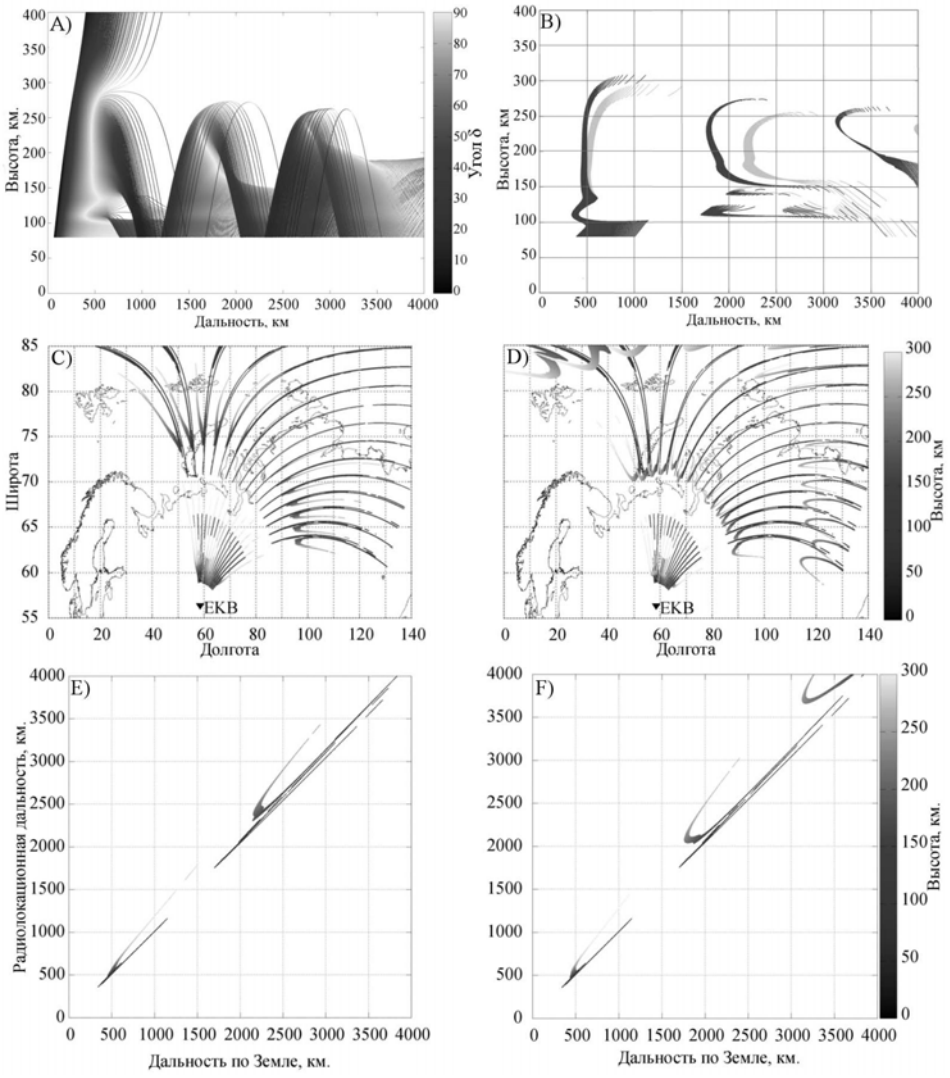


Рис. 105. Результат моделирования зон эффективного рассеяния сигнала на 15-м луче радара EKB 08/06/2015 (13 UT) без коррекции модели IRI (A); Результат моделирования зон эффективного рассеяния сигнала на 15-м луче радара EKB 08/06/2015 (13 UT) до (бледный цвет) и после (яркий цвет) коррекции модели IRI (B). Показаны только зоны с углом δ=90° ±2°; Результат моделирования зон эффективного рассеяния сигнала радара EKB 08/06/2015 (13 UT) до (C) и после (D) коррекции модели IRI. Показаны только зоны с углом δ=90° ±2°; Зависимость радиолокационной дальности от геометрической дальности зоны рассеяния сигнала радара EKB 08/06/2015 (13UT) до (E) и после (F) коррекции модели IRI. Показаны только зоны с углом δ = 90° ±2°

В данной работе использовался метод корректировки, основанный на анализе ВНЗ-сигнала радара EKB. В качестве основного исследуемого параметра выступает групповой путь τ_{max} максимума сигнала ВНЗ. Этот максимум связан с фокусировкой на границе мертвой зоны. Эта зона достаточно плавно сдвигается при изменении основных характеристик фоновой ионосферы — высоты максимума h_mF2 и плазменной частоты f_oF2. Основные характеристики данного максимума (прежде всего его положение) определяются свойствам ионосферы вблизи точки отражения сигнала. Таким образом, зона, из которой мы черпаем информацию о реальной ионосфере для коррекции модели среды распространения, переносится из области над радаром ближе к исследуемой зоне на 500–700 км.

Алгоритм использованного метода коррекции состоит из нескольких этапов:

1. По данным радара EKB рассчитывается групповой путь до максимума сигнала ВНЗ на данный момент времени для данного луча, пропорциональный измеренной групповой задержке сигнала.

2. Проводится поиск адаптированной модели IRI, приводящей к наблюдаемой в эксперименте дальности мертвой зоны. Для этого вводится понятие корректора f_oF2 как отношения плазменной частоты максимума слоя F2 в скорректированной модели к аналогичной характеристике вне модифицированной модели IRI ($C_{foF2}=f_oF2/f_oF2_{IRI}$). Этот коэффициент считается одинаковым для всей ионосферы для данного луча в конкретный момент времени. Вычисление профиля электронной концентрации проводится в три шага: вычисление f_oF2_{IRI} по нескорректированной модели IRI, коррекция f_oF2 домножением на текущий корректор ($f_oF2=C_{foF2}f_oF2_{IRI}$), вычисление профиля электронной концентрации с помощью модели IRI с дополнительным входным параметром f_oF2. На основе системы лучевых уравнений (3.4.6) и полученной скорректированной среды распространения моделируется положение зоны фокусировки ВНЗ-сигнала и групповой путь до его максимума. Данный этап повторяется несколько раз для различных значений корректора. Таким образом, получается зависимость радиолокационной задержки до максимума ВНЗ-сигнала для данного луча радара от величины корректора.

3. По полученной на предыдущем этапе зависимости определяется оптимальный коэффициент $C^0_{f_oF2}$, при котором модельный ВНЗ-сигнал имеет максимум там же, где экспериментальный. Данный коэффициент будет определять требуемое увеличение f_oF2 по сравнению со значением, выдаваемым немодифицированной моделью IRI для каждого вычисленного профиля электронной концентрации ($f_oF2_{corr}=C^0_{f_oF2}f_oF2_{IRI}$). В дальнейшем вычисление профилей электронной концентрации опять происходит в три шага: вычисление f_oF2_{IRI} по нескорректированной модели IRI, коррекция f_oF2 домножением на оптимальный корректор $C^0_{f_oF2}$, вычисление профиля электронной концентрации с помощью модели f_oF2_{IRI} с модифицированной плазменной частотой максимума слоя F2 (f_oF2_{corr}).

Указанные этапы повторялись для каждого требуемого момента времени и луча радара. Результат моделирования зон ракурсного рассеяния до и после корректировки модели IRI на фиксированном луче приведен на рис. 105, B.

Видно, что коррекция среды приводит к значительным сдвигам зон ортогональности в F-слое и практически не меняет положение зоны в E-слое. Это связано с тем, что до E-слоя рефракция очень слаба и модель ионосферы слабо влияет на траекторию. Сдвиги на втором и третьем скачке распространения значительно больше, чем на первом, что связано с нарастанием отклонения с расстоянием за счет накопления эффекта рефракции вдоль траектории.

Аналогичные изменения происходят и при корректировке на остальных лучах радара (рис. 105, C–D). Показано расположение зон ортогональности до (C) и после (D) коррекции. Цветом показана высота точки рассеяния. Более темный цвет соответствует E-слою, более светлй — F-слою. Заметим, что зоны рассеяния в E-слое практически лежат на конфигурационных азимутах радара, так как в эти зоны попадают лучи с малыми углами места, практически совпадающие по направлению с формальными азимутами, вычисленными по земной поверхности. F-зоны значительно отклоняются от формальных азимутов, так как вклад угла места β в реальный азимут луча становится значительным (12).

Для географической привязки реальных данных необходимо установить зависимость дальности точки рассеяния от радиолокационной задержки, измеряемой радаром. Влияние коррекции ионосферы на эту зависимость показана на рис. 105, E–F. Как и на предыдущем рисунке, цвет обозначает высоту точки рассеяния. Стоит обратить внимание на то, что интересующая нас зависимость для E-слоя практически не меняется от коррекции IRI. Это значит, что при исследовании рассеяния в E-слое в большинстве случаев, не требующих высоких точностей, нет необходимости заниматься корректировкой модели среды распространения под реальные данные.

В то же время для географической привязки зон рассеяния в F-слое необходимо осуществлять коррекцию модели, иначе ошибка в определении местоположения может

достигать 500 км по дальности и десятков градусов на координатной сетке, что критично для большинства геофизических приложений.

Таким образом, мы получили зависимость дальности по земле до точки рассеяния, а следовательно и ее географических координат, от радиолокационной дальности (рис. 105, F). Неразрешенным остается вопрос выбора точки рассеяния (в E-слое или F-слое), так как одной и той же радиолокационной задержке могут соответствовать зоны как в одном ионосферном слое, так и в другом.

3.4.4. Интерпретация радиоавроры 11:00–13:00 UT

3.4.4.1. Динамика рассеивающей области по данным радара ИРНР

Как было показано ранее, радиоаврора на радаре ИРНР наблюдается нижними боковыми лепестками, поэтому непосредственное изучение характерной области рассеяния и ее пространственной динамики существенно затруднено. Для анализа пространственно-временной динамики радиоавроры использовалась модель зависимости мощности сигнала по дальности в виде гауссовой функции с постоянной шумовой подложкой:

$$P(R) = A\exp\left(\frac{-\left(R-R_0\right)}{2}\right)\ P(R) = A\exp\left(\frac{-\left(R-R_0\right)^2}{2\sigma_R^2}\right) + A_0, \qquad (14)$$

где A_0 — уровень шума, A — пиковая мощность когерентного эха, R_0 — средняя дальность до когерентного эха, σ_R — характерная протяженность когерентного эха по дальности. Для определения параметров данной функции методом наименьших квадратом были разработаны устойчивые алгоритмы. На следующем шаге в диапазоне $R \in \left[R_0 - \sigma_R, R_0 + \sigma_R\right]$ определялась средняя разность фаз между каналами $\Delta\varphi$ как аргумент коэффициента корреляции (9). В свою очередь, $\Delta\varphi$ посредством (10) связана со средним азимутом γ.

Для данной антенны по данным о дальности и азимутальном углу практически невозможно без дополнительных предположений определить угол места неоднородностей и географическое положение этой области.

Существуют различные методы введения таких дополнительных предположений. Во-первых, можно считать, что рассеяние происходит на фиксированной высоте E-слоя, которая определяется из каких-либо моделей или экспериментов. Противоположным способом определения угла места является задание полной плавной модели рассеивающих неоднородностей в зависимости от высоты и угла рассеяния и поиск результата в виде интеграла по этой области рассеяния с определением параметров слоя с рассеивающими неоднородностями в рамках решения обратной задачи [12]. Однако, как показал проведенный нами ранее анализ, в случае этого эксперимента алгоритм будет работать неустойчиво, поскольку для устойчивости требуется наличие радиоавроры на дальностях 1100 и 550 км [27].

Промежуточным способом, использованным нами в этой работе, является предположение о том, что область радиоавроры можно определять положением центра области рассеяния и характерным поперечным пространственным размером этой области. Основное направление на область радиоавроры в этом предположении определяется лучами, перпендикулярными силовым линиям геомагнитного поля. В качестве модели магнитного поля нами была выбрана международная референтная модель IGRF [25], хорошо себя зарекомендовавшая в решении подобных задач [12]. Анализ показал, что для заданных антенного азимута и дальности существует единственное решение (угол места или высота области рассеяния), при которых обеспечивается условие перпендикулярности (рис. 106, L).

Анализ показал, что для данного антенного азимута θ и дальности R существует единственное решение (угол места γ), при котором обеспечивается условие перпендикулярности магнитному полю [12]. Для численных расчетов, приводимых в этой работе, эта зависимость была аппроксимирована простым аналитическим приближением:

$$\theta = a_1\gamma^2 + a_2R^2 + a_3\gamma R + a_4\gamma + a_5R + a_6, \qquad (15)$$

где угол γ — азимут в антенной системе координат, R — дальность в км, коэффициенты a_i — постоянные на рассматриваемых дальностях в пределах основного лепестка диаграммы направленности ИРНР. Указанная формула аппроксимирует угол во всей исследуемой области пространства с точностью не хуже 0.01°, что существенно лучше требуемой точностью эксперимента, поэтому данным отклонением можно пренебречь. Аналитическое представление использовалось для обеспечения гладкости моделируемой функции, необходимой для увеличения стабильности алгоритмов численного решения задачи определения пространственного размера.

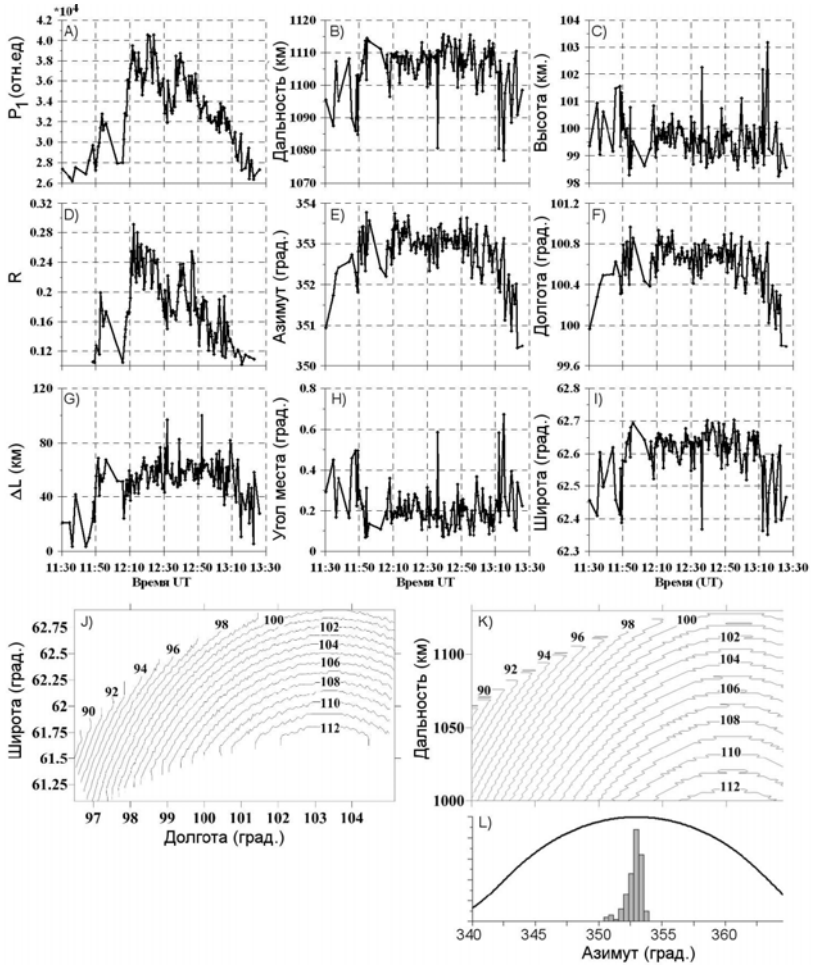


Рис. 106. Динамика пространственных характеристик области радиоавроры: значения параметров, полученных в результате обработки экспериментальных данных (A–I); положение областей перпендикулярности луча зрения магнитному полю как функция широты и долготы (J); положение областей перпендикулярности луча зрения магнитному полю как функция азимута и дальности (K); распределение азимутов угла прихода рассеянного сигнала и диаграмма направленности антенны (сплошная линия) (L)

Оценку поперечного размера области рассеяния можно получить, проанализировав модуль коэффициента корреляции сигналов на полурупорах η. В присутствии шума, не коррелирующего с сигналом, выражение для коэффициента корреляции (9) можно записать в виде

$$\eta = \eta_s \frac{S_N}{S_N + 1} + \eta_N \frac{1}{S_N + 1}, \qquad (16)$$

где S_N — отношение сигнал/шум, η_S — коэффициент корреляции в отсутствие шума, η_N — коэффициент корреляции шумового сигнала (или фоновый уровень). Дальнейшие расчеты нами проводились в следующей модели. Пусть пространственная корреляционная функция флуктуаций плотности $\Phi\left(\vec{R_0},\vec{r}\right)$ зависит только от расстояния $\vec{r}$ от центра неоднородности $\vec{R_0}$. Для простоты будем предполагать, что коэффициент корреляции в отсутствие шумов $\Phi\left(\vec{R_0},\vec{r}\right)$ описывается в поперечном к лучу зрения направлении гауссовой функцией по углам:

$$\Phi\left(\vec{R},\vec{r}\right)=\exp\left(\frac{-\left(\gamma-\gamma_0\right)^2}{2\sigma^2}\right). \tag{17}$$

Здесь γ_0 — угловое положение центра неоднородности $\vec{R_0}$, σ — характерный угловой размер неоднородности, который подлежит оценке, $\gamma=\arccos\left(\frac{\vec{R},\vec{r}}{rR_0}\right)$.

Основной лепесток диаграммы направленности верхнего ($F1$) и нижнего ($F2$) полурупора ИРНР в азимутальной плоскости с хорошей точностью можно аппроксимировать гауссовой функцией

$$F_{1,2}(\gamma)=\exp\left(\frac{-\left(\gamma+\gamma_{1,2}\right)^2}{2\Theta^2}\right), \tag{18}$$

где $\gamma_{1,2}=\pm 0.83°$ — антенный азимут максимума диаграммы направленности верхнего/нижнего полурупора, $\Theta=10.7°$ — ширина диаграммы направленности полурупора. На излучение двухканальная система ИРНР работает синфазно, как одна антенна, диаграмму направленности которой также можно аппроксимировать гауссовой функцией

$$F_0(\gamma)=\exp\left(\frac{-\gamma^2}{2\Theta_0^2}\right), \tag{19}$$

где $\Theta_0=6.4°$ — ширина диаграммы антенны ИРНР при синфазном излучении верхнего и нижнего полурупоров. С учетом перечисленных выше замечаний выражение для коэффициента когерентности в отсутствие шумов η_S имеет следующий вид:

$$\eta_S=\exp\left(\left\{i\gamma-2\sigma^2\left(\frac{k_\varphi^2}{4}+\frac{\gamma_{1,2}^2}{\Theta^2}\right)\right\}\frac{\Theta_0^2\Theta^2}{\Theta_0^2\Theta^2+2\sigma^2\left(\Theta_0^2+\Theta^2\right)}\right), \tag{20}$$

где k_φ — наклон фазо-азимутальной характеристики, введенный в (11).

В выражении (3.4.13) явно выделен известный [28] факт зависимости модуля η_S от углового размера неоднородности σ. Обычно отношение сигнал/шум и коэффициент корреляции шума могут быть получены из измерений. Тогда на основе (16) и (20) можно сделать оценку углового размера неоднородности σ.

Измерения показали, что $\eta_N \approx 0.08$; $\eta \approx 0.28$ (что можно оценить по рис. 106, С3, взяв за η_N значение на малых дальностях, где нет когерентного эха, а за η — значение в максимуме коэффициента корреляции на дальности 1100 км). Значение сигнал/шум $S_N \approx 0.43$ можно оценить по рис. 106, А3, взяв соотношение между максимальной и минимальной мощностью. Подставляя указанные значения в (3.4.9) получаем $\eta_S=0.75$, что соответствует, согласно (3.4.13), поперечному угловому размеру неоднородности $\sigma \approx 3.2°$ или пространственному поперечному размеру ≈ 60 км.

На рис. 106, A–I приведены результаты обработки экспериментальных данных. Как показал анализ, основой выводов о положении и поведении радиоавроры следует считать период 11:50–13:10 UT, когда регистрировался наиболее мощный сигнал. Положение области обратного рассеяния в рассматриваемый период времени зафиксировано на дальности 1107 ±10 км, азимуте 353° ±0.8°, углу места 0.2° ±0.15°, что соответствует высоте 99.5 ±1.2 км, долготе 100.7° ± 0.3° и широте 62.6° ±0.1°, причем продольный размер рассеивающей области (вдоль радиолокационной дальности) менялся в диапазоне 58 км ±20 км.

Динамика рассматриваемых параметров в периоды 11:30–11:50 UT и 13:10–13:30 UT, особенно ярко выраженная в динамике азимута и долготы (рис. 106, E, F), связана не с перемещением рассеивающей области, а с понижением отношения сигнал/шум, заметном на рис. 106, A и приводящем к ошибке в определении разности фаз Δφ. Это приводит к ошибке определения антенного азимута (рис. 106, E) и в других производных от него координатных характеристиках (рис. 106, F–I).

Из сравнения рис. 106, B, K, L можно заметить, что высота области рассеяния варьирует достаточно мало и лежит на границе линии горизонта радара. Это, в свою очередь, позволяет предположить, что основной рассеивающий слой может быть расположен ниже 99–100 км (рис. 106, C) и высока вероятность того, что на самом деле мы видим лишь его верхнюю область, а нижняя часть скрыта линией горизонта. Кроме того, это говорит о том, что слой может быть достаточно узким, не выходящим за пределы 100 км по высоте, поскольку в случае его существенной ширины условия ракурсности выполнялись бы одновременно на большем диапазоне азимутов, чем наблюдалось в результате эксперимента.

Следует отметить, что по данным интерферометрии на радаре ИРНР мы оцениваем не точное местоположение рассеивающей области, а лишь положение ее эффективного центра и все изложенные рассуждения справедливы лишь для характеристик эффективного центра.

3.4.4.2. Динамика рассеивающих областей по данным радара EKB

На рис. 107, G приведено относительное положение областей ракурсности по данным радаров EKB (градации серого) и радиоавроры по данным ИРНР (черный).

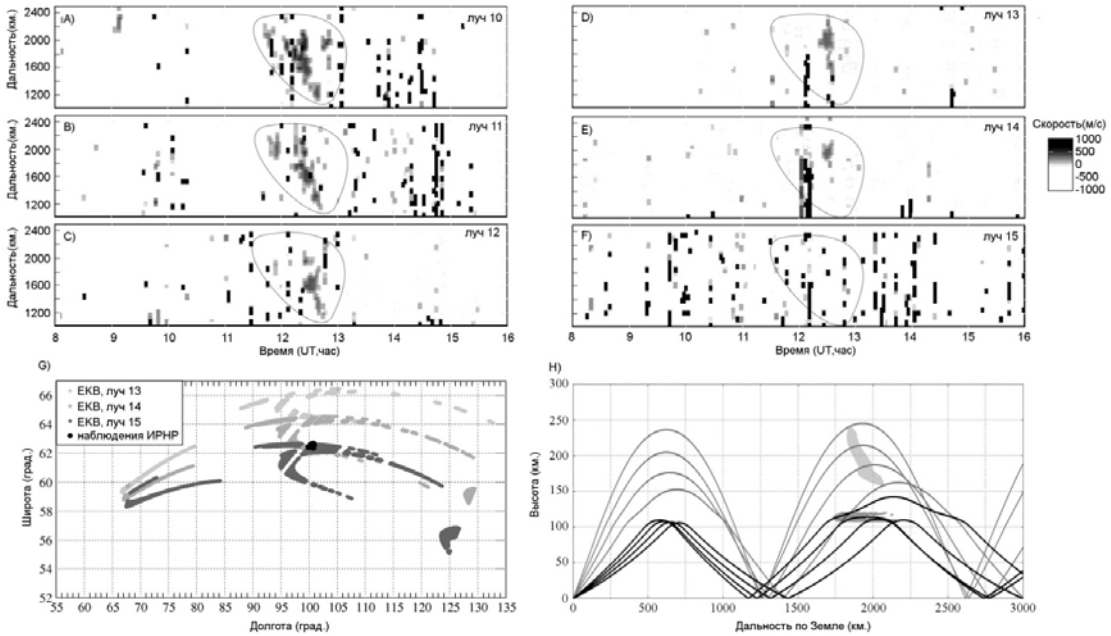


Рис. 107. Доплеровские скорости по данным радара EKB на 10–15-м лучах радара. Замкнутой серой зоной обозначена область эффекта на радаре EKB (A–F); области возможного рассеяния на радаре EKB (на лучах 13–15) — серые линии, черным обозначена область наблюдения рассеяния на ИРНР (G); траектории распространения сигнала (линии) и положение областей ортогональности (серые области) в 12:30–12:40 UT на 14-м луче радара EKB (H)

Как видно из рис. 107 (A–F), мощное рассеяние на радаре EKB наблюдается на лучах 10–14 и практически не наблюдается на луче 15. В то же время зоны с выполнением условий ракурсности, необходимых для рассеяния, на 15-м луче существуют (рис. 107, G). Это говорит о том, что область рассеяния, по-видимому, ограничена по широте траекторией 14-го луча, что позволяет заключить, что наиболее интенсивные действующие неоднородности в КВ-диапазоне можно считать существенно ограниченными по широте областью порядка 62–64° N в зависимости от высоты рассеяния.

Как показал анализ данных спутников DMSP [29], приведенный на рис. 108, в указанное время 11:00–13:00 в области долгот 30–65° E действительно наблюдалось возникновение области высокого электрического поля со сложной мелкомасштабной пространственной структурой (черная линия) с ее последующим экваториальным распространением (серая и штриховая линии) и уменьшением напряженности. После 13:00 скачок скорости слабо выражен на данных DMSP.

При анализе была проведена предварительная коррекция горизонтальной ионной скорости полученной на DMSP, заключающаяся в прибавлении к измеренной горизонтальной скорости ионов западно-восточной скорости движения

$$V_{\mathrm{E}} = \frac{2\pi\left(R_{\mathrm{E}} + H\right)\cos\varphi}{86400}\,(км/с), \tag{21}$$

связанной с суточным вращением Земли [29] (точнее, проекции скорости V_{E} на траекторию полета спутника). Здесь R_{E} — радиус Земли в километрах, H — высота полета спутника в километрах, φ — его географическая широта. Это позволяет частично компенсировать эффект коротации ионов и земной поверхности и более корректно связать измеренную скорость частиц с электрическим полем в ионосфере.

Приведенное на рис. 108, H–I сопоставление позволяет говорить о том, что возникновение перемещающейся области связано, скорее всего, с проникновением узкой области высоких электрических полей со сложной внутренней структурой на средние широты с характерным размером порядка нескольких градусов по широте и 10–15° по долготе.

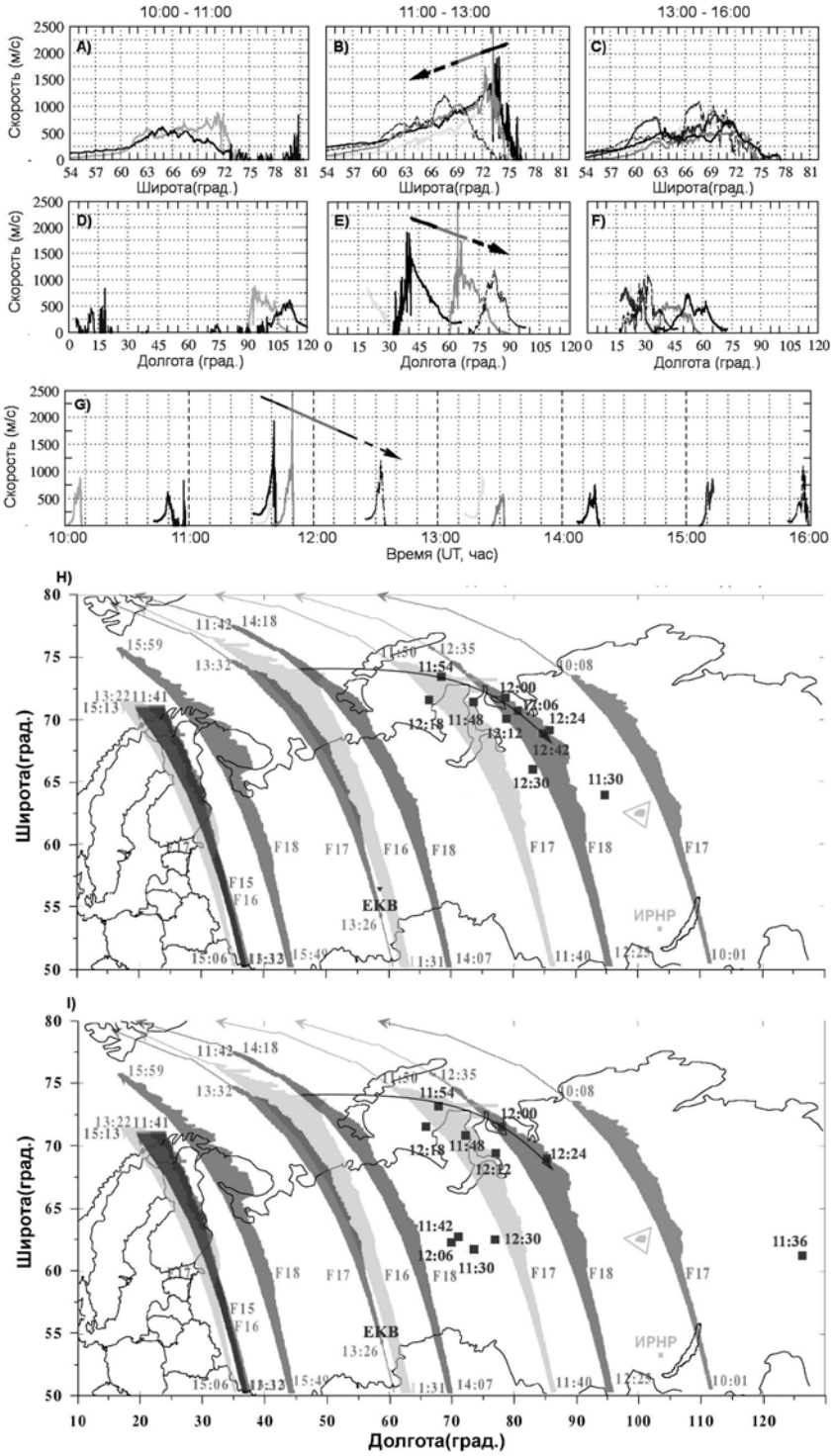


Рис. 108. Горизонтальная скорость ионов по данным DMSP как функция широты (A–C), долготы (D–F), времени (G). Вместе с положением области по данным радаров в предположении КВ-неоднородностей на высоте E-слоя (H) и F-слоя (I) серым треугольником отмечена область наблюдения радиоавроры на радаре ИРНР, черными квадратами — динамика области рассеяния на радаре EKB. Серая стрелка указывает динамику перемещения области высоких ионных скоростей (высоких электрических полей) по данным DMSP

Следует отметить, что и по данным SuperDARN движение неоднородностей начинается приблизительно с 75° N, как и на данных DMSP, что также подтверждает предположение о связи механизма генерации наблюдаемой радиоавроры с интенсивным электрическим полем. Вытянутость вдоль траектории наблюдений радиоавроры положений перемещения электрического поля также подтверждает указанную связь.

3.4.5. Обсуждение полученных результатов

Для интерпретации радиоавроры 11:00–13:00 UT нами была проведена фильтрация данных ЕКВ по доплеровскому смещению частоты в диапазоне скоростей 200–1000 м/с, соответствующем наиболее интенсивной авроре в это время.

На рис. 109 приведены значения характеристик сигналов с учетом выполненных калибровок обоих радаров. Из приведенных на рис. 109, A–D видно, что на КВ-радаре ЕКВ аврора начала устойчиво наблюдаться на 6–12 мин раньше, чем на УКВ-радаре ИРНР. Это связано прежде всего с расширенным сектором обзора радара ЕКВ, позволяющим проследить возмущение с более высоких широт (рис. 109, E).

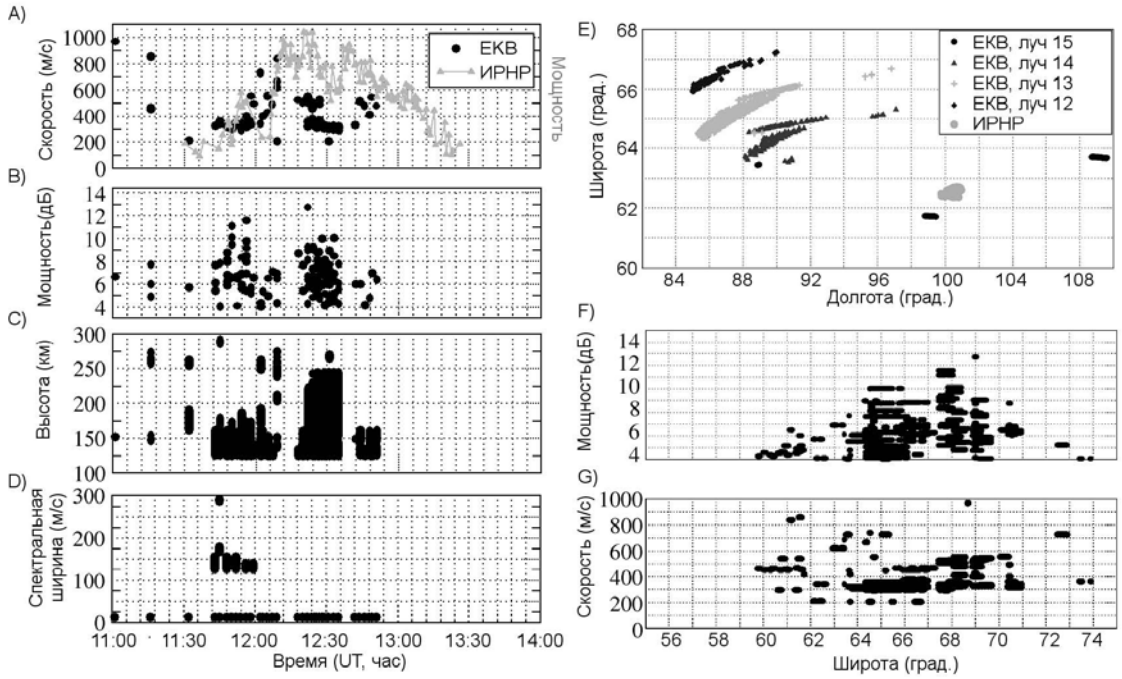


Рис. 109. Данные радара ЕКВ по сравнению с характеристиками рассеяния на радаре ИРНР: A — сравнение доплеровской скорости на радаре ЕКВ (черный) и мощности на радаре ИРНР (серый); B — мощность рассеяния на радаре ЕКВ как функция времени; C — вероятная высота рассеяния на радаре ЕКВ как функция времени; D — ширина спектра на радаре ЕКВ, приведенная к единицам скорости, как функция времени; E — широта и долгота рассеяния на радарах; F — зависимость мощности рассеяния на радаре ЕКВ от долготы; G — зависимость доплеровской скорости на радаре ЕКВ от долготы

Полученные данные показывают (рис. 109, F), что на более низких широтах (60–64° N) на КВ-радаре мощность рассеянного сигнала была несколько ниже, чем на более высоких широтах, в то время как наблюдаемые доплеровские скорости при этом были выше (рис. 109, G). Это позволяет предположить, что на более низких широтах на радаре ЕКВ наблюдалось скорее рассеяние в F-слое, характеризуемое меньшими амплитудами и большими скоростями.

Более реалистичным, с нашей точки зрения, является рассеяние КВ-сигнала на неоднородностях F-слоя (рис. 107, H; 108, I), более традиционное для подобных дальностей от радара и соответствующее общепринятой модели виртуальной высоты рассеяния [30]. В этом случае высота рассеяния, соответствующая зоне рассеяния на радаре ИРНР, составляет порядка 170–240 км (рис. 107, H). В этом случае наблюдаемая доплеровская скорость на радаре ЕКВ является следствием **E**×**B**-дрейфа [6] и может использоваться для оценок соответствующей составляющей электрического поля. Из рис. 107, H и 108, H видно, что сильная рефракция в E-слое, существование которого предсказывается проведенным нами моделированием, может приводить также к рассеянию и на высотах E-слоя.

Поэтому высота КВ-радиоавроры на основе полученных данных, по-видимому, не может быть определена, а определение широты КВ-радиоавроры на долготе наблюдения УКВ-радиоавроры во время этого эксперимента не может быть точнее, чем 2° по широте.

Из рис. 109, Е видно, что на 15-м луче интенсивного рассеяния не наблюдалось, что связано, по-видимому, с исчезновением в этой области условий для формирования неустойчивостей — высоких электрических полей. Это дает возможность оценить нижнюю границу проникновения электрического поля в это время как 62–63° N.

Публикации:

Лебедев В.П., Кутелев К.А., Гркович К.В., Кушнарев Д.С., Бернгардт О.И. Первые результаты исследования высокоширотного ионосферного радиоэхо в УКВ- и КВ-диапазонах по данным радаров ИСЗФ СО РАН // Гелиогеофизические исследования в Арктике. Мурманск, 2016: Тезисы докладов. 2016 (http://pgia.ru/content/site/pages/ConfGelio/Lebedev-abstract.doc)

Список использованных источников:

1. Lovell A.C.B., Clegg J.A., Ellyett C.D. // Nature. 1947. V. 160. P. 372. DOI: 10.1038/160372a0.
2. Багаряцкий Б. А. // УФН. 1961. Т. 63. С. 197.
3. Свердлов Ю.Л. Морфология радиоавроры. Л.: Наука, 1982. 160 с.
4. Успенский М.В., Старков Г.В. Полярные сияния и рассеяние радиоволн. Л.: Наука, 1987. 237 с.
5. Moorcroft D.R. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92 (A8). P. 8723. DOI: 10.1029/JA092iA08p08723.
6. Chisham G., Lester M., Milan S.E. ,Freeman M.P., Bristow W.A., Grocott A., McWilliams K.A., Ruohoniemi J.M., Yeoman T.K., Dyson P.L., Greenwald R.A., Kikuchi T., Pinnock M., Rash J.P.S., Sato N., Sofko G.J., Villain J.-P., Walker A.D.M. // Surveys in Geophysics. 2007. V. 28 (1). P. 33.
7. Potekhin A.P., Berngardt O.I., Kurkin V.I., Shpynev B.G., Zherebtsov G.A. // Proc. SPIE3983, Sixth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. November 19, 1999. P. 328. DOI: 10.1117/12.370511.
8. Berngardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V. // Earth, Planets and Space. 2015. p. 67. DOI: 10.1186/s40623-015-0302-3.
9. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В., Носов В.Е., Потехин А.П., Шпынев Б.Г. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1339.
10. Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Shpynev B.G. // Cosmic Res. 2008. P. 46. DOI: 10.1134/S0010952508040102.
11. Zolotukhina N.A., Berngardt O.I., Shpynev B.G. // Geomagnetism and Aeronomy. 2007. V. 47 (3). P. 343. DOI: 10.1134/S0016793207030103.
12. Grkovich K.V., Berngardt O.I. // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. P. 49. DOI: 10.1134/S0016793209080386.
13. Foster J.C., Erickson P.J. // GRL. 2000. V. 27 (19). P. 3177.
14. Berngardt O.I., Voronov A.L., Grkovich K.V. // Radio Sci. 2015. V. 50 (6). P. 486. DOI: 10.1002/2014RS005589.
15. Gillies R.G., Hussey G.C., Sofko G.J., McWilliams K.A., Fiori R.A.D., Ponomarenko P., St.-Maurice J.-P. // J. Geophys. Res.. 2009. V. 114 (A07305). DOI: 10.1029/2008JA013967.
16. Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. // Radio Sci. 2016. V. 51. DOI: 10.1002/2016RS006081.
17. Bristow W.A., Hampton D.L., Otto A. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. p. 1349. DOI: 10.1002/2015JA021862.
18. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
19. Лебедев В.П. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов: Дисс. к. ф.-м. н. Иркутск, 2015. 118 с.

20. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980.

21. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. // J. Space Weather. V. 4. A07. P. 1. DOI: 10.1051/swsc/2014004, 2014.

22. Bartels R. H., Beatty J.C., Barsky B.A. An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modeling. Morgan Kaufmann, 1987. ISBN 9781-55860-400-1.

23. Butcher J.C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations. John Wiley, 2003. ISBN 978-0-471-96758-3.

24. Hairer E., N¨orsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I: Non-stiff Problems (2nd ed.) Berlin: Springer Verlag, 1993. ISBN 978-3-540-56670-0.

25. Th´ebault E. et al. // Earth, Planets and Space. 2015. P. 67.

26. Nasyrov A.M. Scattering of radiowaves from anisotropic ionospheric irregularities. Kazan University, 1991. (In Russian).

27. Гркович К.В. Моделирование характеристик сигнала среднеширотного когерентного эха по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния: Дисс. к.ф.-м.н. Иркутск, 2016. 108 с.

28. Farley D.T., Ierkic H.M., Fejer B.G. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 1467.

29. Hairstone M.R., Heelis R.A. //Technical report. 1993. PL-TR-93-2036.

30. Chisham G., Yeoman T.K., Sofko G.J. // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 823.

3.5. Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климата

3.5.1. Выявление основных физических процессов и механизмов, наряду с солнечной активностью ответственных за изменения климата

В настоящее время нет четкого ответа на вопрос, какие процессы в климатической системе ответственны за изменения климата. В еще большей степени это относится к прогнозам климата с учетом антропогенных воздействий. В связи с этим крайне важно ответить на вопрос, какова природа изменений климата. Это имеет не только теоретическое, но и прикладное значение. Необходимо установить также, в какой мере глобальное потепление в последние десятилетия XX в. имеет антропогенное происхождение в противоположность естественному. Это имеет первостепенное значение как для понимания характера изменения климата на Земле в прошлом и будущем, так и для планирования тех видов человеческой деятельности, которые могут оказывать влияние на климатическую систему Земли.

Обобщая результаты, полученные на предыдущих этапах выполнения проекта, выделены основные физические процессы, ответственные за наблюдаемые изменения регионального и глобального климата: 1) теплообмен в системе океан–атмосфера–суша, эффективность которого определяется изменениями общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и ветрового напряжения; 2) вклад солнечной активности (СА); 3) перестройка глубинной океанической циркуляции; 4) долговременные изменения толщины и площади морского льда; 5) изменение концентрации парниковых газов. Каждый из этих процессов характеризуется значительной временной изменчивостью и пространственной неоднородностью.

В конце XIX в. началось потепление, которое, за исключением 1944–1976 гг., продолжалось до 2000 г. (рис. 110). Средняя глобальная температура повысилась за последние 100 лет на 0.8 °C. Потепление климата в XX в. происходило в 1910–1945 и 1977–2000 гг. После 2000 г., как видно на рис. 110, возрастание температуры практически прекратилось. В этот период геомагнитная активность существенно уменьшилась, а концентрация парниковых газов в атмосфере продолжала возрастать.

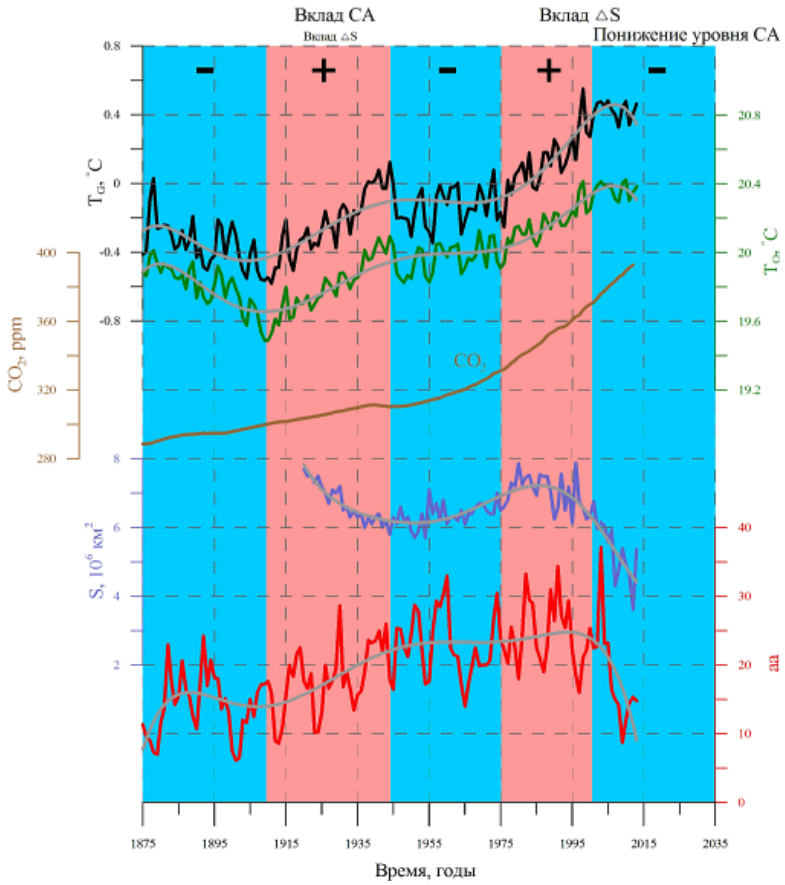


Рис. 110. Эпохи климатических изменений в XX в.: аномалии глобальной температуры (черная линия), температура поверхности океана (60° N — 60° S) (зеленая линия), концентрация CO_2 в атмосфере (коричневая линия), площадь *S* морского льда в сентябре для Арктического бассейна (синяя линия) и уровень геомагнитной активности — *aa*-индекс (красная линия). Знаки "+" и "–" обозначают периоды ослабленной и усиленной глубиной океанической циркуляции соответственно

На основе комплексного анализа гидрометеорологических данных наблюдений можно выделить климатические эпохи (КЭ) в изменениях температуры поверхности океана (ТПО), которые характеризуются различными типами глубинной океанической циркуляции и общей циркуляцией атмосферы. На рис. 110 представлены изменения ТПО, аномалии глобальной температуры воздуха, изменения концентрации углекислого газа в атмосфере и площади льда в Арктике, а также вариации уровня геомагнитной активности (*aa*-индекс). В изменениях температуры прослеживаются периоды роста и спада продолжительностью около 30–40 лет. Красным и синим показаны соответственно периоды ослабления и усиления глубинной циркуляции в океане. Видно, что в периоды первого потепления (1910–1945 гг.) ослабление вертикального перемешивания совпало с ростом геомагнитной активности (ГА), в период второго потепления (1977–2000 гг.) геомагнитная активность остается на постоянном уровне, а рост концентрации CO_2 в атмосфере составляет 30 % от общего возрастания за весь рассмотренный период.

В периоды ослабления глубинной циркуляция в океане наблюдается потепление климата, а в периоды усиленной циркуляции происходит понижение ТПО, похолодание и увеличение теплосодержания Мирового океана. Наибольший вклад глубинной циркуляции в изменение температурных структур слоев океана преимущественно наблюдается на средних широтах.

Наряду с уменьшением глубинной конвекции, усиление эффективности теплообмена в системе океан–атмосфера–суша (О–А–С) также приводит к повышению температуры. В качестве примера изменений в системе О–А–С приводятся потоки тепла, направленные из океана в атмосферу для района Атлантического океана и потоки, направленные от

поверхности океана в нижележащие слои для областей Тихого океана (рис. 111). Из рис. 3.5.1.2, *а* видно, что в эпоху понижения температуры (1944–1976 гг.) для Атлантического района наблюдается уменьшение потока тепла из океана в атмосферу, а в 1976–2000 гг. происходит увеличение потока до значений, наблюдавшихся в 1948 г. Для регионов Тихого океана (рис. 111, *б*) в 1948–1976 гг. отмечается возрастание потока тепла, направленного вглубь от поверхности, а после наблюдается незначительное его понижение. Наблюдаемые изменения в процессах теплообмена между атмосферой и океаном наглядно указывают на переход от одной климатической эпохи к другой.

Увеличение солнечной и геомагнитной активности в начале XX в. совпало с положительной фазой Северного Атлантического колебания, которое способствовало интенсификации межширотного переноса тепла в атмосфере и океане за счет интенсивного теплообмена, связанного с ветровым напряжением у поверхности океана, особенно в Северной Атлантике. Это сопровождалось усилением меридиональной циркуляции в атмосфере и поверхностных водах океана, соответствующим интенсивному меридиональному переносу тепла в Арктику в 1900–1940 гг. Увеличение температуры тропосферы (в период 1910–1940 гг.) началось раньше в полярных областях с запаздыванием относительно возрастания геомагнитной активности (примерно на 10 лет), которое связано с большой теплоемкостью Арктического бассейна. Эффективное воздействие геомагнитной активности на радиационный баланс полярных областей обеспечило уменьшение радиационного выхолаживания и увеличение приземной температуры воздуха в высокоширотных областях. С некоторым запаздыванием (1920–1940 гг.) началось эффективное таяние морского льда в Арктическом бассейне и сокращение его площади в теплый сезон. В период второй фазы глобального потепления (1980–2000 гг.) также наблюдалось уменьшение площади морского льда во все сезоны, наиболее значительное в Тихоокеанском регионе в теплый период.

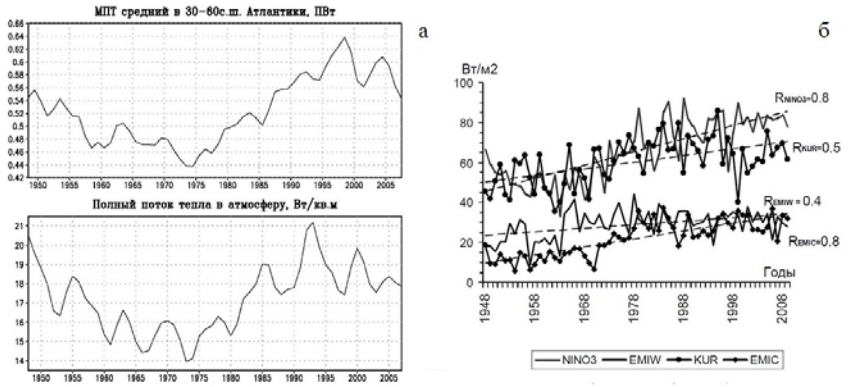


Рис. 111. Временной ход меридионального переноса тепла и полного потока тепла из океана в атмосферу в Атлантике (1948–2009 гг.), усредненный в интервале 30–60° N (*а*); климатические тренды (1948–2009 гг.) и колебания потока тепла Q (Вт/м^2) от поверхности океана в нижележащие слои океана в восточной (NINO3), западной (EMIW), центральной (EMIC) частях тропических и экваториальной зон Тихого океана, а также в юго-западной области субтропиков (20–30° N, 130–170° E) (KUR) (*б*)

Уменьшение площади морского льда усиливает действие потепления за счет положительной обратной связи потепление — уменьшение ледовитости — уменьшение альбедо — повышение температуры воздуха. Наряду с такой положительной обратной связью, действовавшей в 1920–1940 гг., в 1940–1975 гг. наблюдалась отрицательная обратная связь потепление — распреснение верхнего слоя — замедление термохалинной циркуляции поверхностных вод в океане — уменьшение потока тепла из океана в атмосферу — понижение температуры воздуха — увеличение протяженности морского льда, которая ответственна за изменение теплосодержания Атлантического и Мирового океанов в 1970–1980 гг. (рис. 112, *а*). В качестве примера влияния глубинной океанический циркуляции на вариации температурных характеристик океана на рис. 112 показана пространственная зави-

симость изменений теплосодержания (рис. 3.5.1.3, *а*) и температуры (рис. 112, *б*) от глубины. Изменения в теплосодержании показывают, что максимальные значения тренда за долговременный интервал происходили на широтах от 30 до 40° в Северном полушарии.

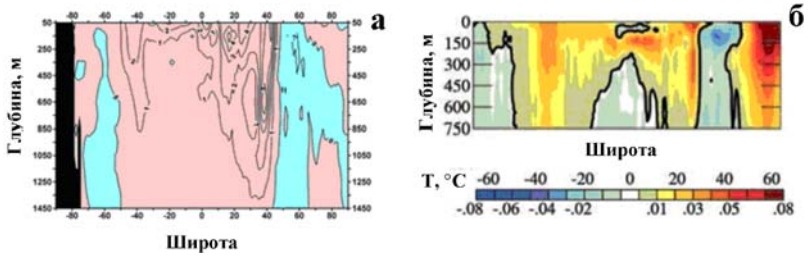


Рис. 112. Линейный тренд (1955–2003 гг.) зонального интегрального теплосодержания Атлантического океана и значения теплосодержания для каждого 100-метрового слоя с интервалом между изолиниями $2 \cdot 10^{18}$ Дж/год (*а*); тренды зонально усредненной температуры по глубине и широте в 1993–2003 гг. (*б*)

Полученные в ходе выполнения проекта результаты, а именно, выявленные основные физические процессы и механизмы, ответственные за изменения климата для конкретных временных эпох, даны в табл. 7.

Таблица 7. Основные механизмы, ответственные за смену климатических эпох

Период эпохи	Температурный режим	Механизмы / процессы / характеристики эпохи
1868–1910 гг.	Понижение температуры / похолодание	Усиленная глубинная циркуляция в океане, ослабленный поток тепла из океана в атмосферу (теплонакопление), понижение уровня СА
1911–1943 гг.	Рост температуры / потепление	Аномально усиленный меридиональный перенос тепла в Атлантике, ослабленная глубинная циркуляция в океане, усиленный поток тепла из океана в атмосферу (теплоотдача), усиленный теплообмен в системе океан–атмосфера–суша, возрастание уровня СА, уменьшение толщины и площади Арктического льда
1944–1976 гг.	Понижение температуры	Усиленная глубинная циркуляция в океане, ослабленный поток тепла из океана в атмосферу (теплонакопление), увеличение концентрации CO_2 в атмосфере
1977–2003 гг.	Рост температуры / потепление	Ослабленная глубинная циркуляция в океане, усиленный поток тепла в атмосферу (теплоотдача), значительное сокращение ледовитости в Арктическом бассейне, возрастание концентрации CO_2
2004 – настоящее время	Постоянство температуры / (понижение температуры)	Ослабление потока тепла из океана в атмосферу, увеличение теплосодержания Мирового океана, минимальные значения площади льда в Арктике, понижение уровня СА, увеличение концентрации CO_2

Таким образом, установлено, что последние 150 лет климатическая система характеризуется закономерным квазициклическим чередованием устойчивых климатических эпох продолжительностью около 30–40 лет. Переход от одной эпохи к другой происходит скачкообразно в течение 1–2 лет. Основное различие этих эпох связано с изменением эффективности теплообмена в системе океан–атмосфера–суша, которая обусловлена общей циркуляцией атмосферы и ветровым напряжением. В одну КЭ преобладает поток тепла в океан (теплонакопление), в другую эпоху — поток тепла в атмосферу (теплоотдача).

Выявлено, что изменение климата на временных масштабах 30–40 лет определяется в основном перестройкой ОЦА, глубинной океанической циркуляцией и вариациями уровня солнечной активности. Кроме того, определенный вклад вносят изменения площади

и толщины морского льда, границы снежного покрова и содержание парниковых газов в атмосфере.

Солнечная активность внесла значительный вклад в изменение глобального климата во время первого потепления в XX в. (1910–1943 гг.) и в 2000–2015 гг. Первый период характеризуется значительным положительным трендом геомагнитной активности, максимальным за весь рассмотренный временной интервал (1868–2015 гг.), который совпал с усиленным меридиональным переносом тепла в Северной Атлантике.

Публикации:

1. Кириченко К.Е., Коваленко В.А. Основные физические процессы и механизмы, ответственные за изменения ТПО. Климатические эпохи // 20-я Школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты»: Тезисы докладов. Нижний Новгород, 2016. С. 31.

2. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Кириченко К.Е. Основные физические процессы и механизмы, ответственные за изменения климата в XX веке // Изв. ИГУ. 2017 (направлена в печать).

3.5.2. Исследование пространственно-временных изменений термодинамических характеристик Мирового океана

Теплосодержание Мирового океана является важнейшим фактором изменений как регионального, так и глобального климата благодаря своей высокой теплоемкости и инерционности. Согласно данным пятого оценочного доклада межправительственной группы экспертов по изменению климата, более 60 % общего увеличения теплосодержания в климатической системе наблюдается в верхнем слое океана (0–700 м).

Для того чтобы проанализировать изменение теплосодержание океана, были построены карты аномалий теплосодержания (рис. 113, *а*, *в*) и ТПО (рис. 113, *б*, *г*), усредненные за 1955–1976 и 1977–2000 гг., для северной части Тихого океана. Выбранные временные интервалы соответствуют наблюдаемым периодам понижения и повышения глобальной приземной температуры воздуха.

По данным, показанным на рис. 113, видно, что при переходе от одного периода к другому происходит смена знака изменений аномалий теплосодержания и ТПО. Так в 1955–1976 гг. наблюдаются отрицательные аномалии теплосодержания вдоль западного побережья Северной Америки и в низкоширотной области центральной части Тихого океана. В это же время отмечается положительная аномалия для внетропической части Тихого океана в районе 35–45° N, 160° E –150° W и к югу от Японских островов в районе зарождения течения Куросио. В 1977–2000 гг. наблюдается противоположная картина.

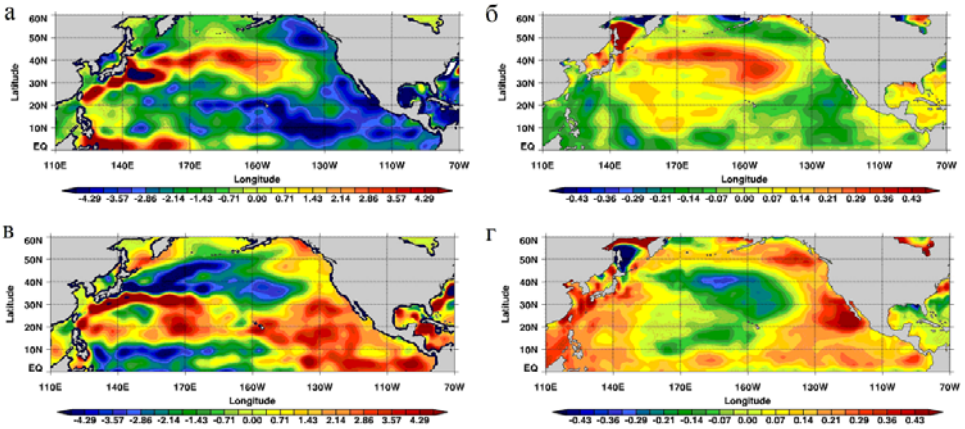


Рис. 113. Аномалии теплосодержания океана в слое 0–700 м (*а*, *в*) и ТПО (*б*, *г*) для Тихого океана (Северное полушарие) в 1955–1976 гг. (*а*, *б*) и 1977–2000 гг. (*в*, *г*)

Перестройка ветрового напряжения приводит к усилению взаимодействия океана и атмосферы и потере тепла поверхностью океана и наоборот. Для исследования этого взаимодействия в рассматриваемые периоды были построены карты аномалий ветрового напряжения, отражающие особенности циркуляции атмосферы в регионе (рис. 114). Видно, что структура атмосферной циркуляции в исследуемом регионе изменилась. В 1955–1976 гг. (рис. 114, *а*) характерно наличие антициклонического типа циркуляции на средних широтах с центром между 150–170° W, а в 1977–2000 гг. (рис. 114, *б*) данный тип смещен на более высокие широты, обеспечивая перемещение потоков с севера на юг. Таким образом, если в первый период отмечается увеличение теплосодержания вдоль средних широт за счет поступления более теплых потоков, то для второго периода преобладает меридиональная циркуляция с направлением от высоких (холодных) широт к низким, что способствует уменьшению температуры и теплосодержания. В результате смены структуры ветрового напряжения наблюдается изменение пространственного распределения поверхностной температуры на средних широтах Тихого океана. Таким образом, изменения ОЦА и ветрового напряжения в рассматриваемом регионе Тихого океана оказывают значительное влияние на вариации ТПО и теплосодержания океана.

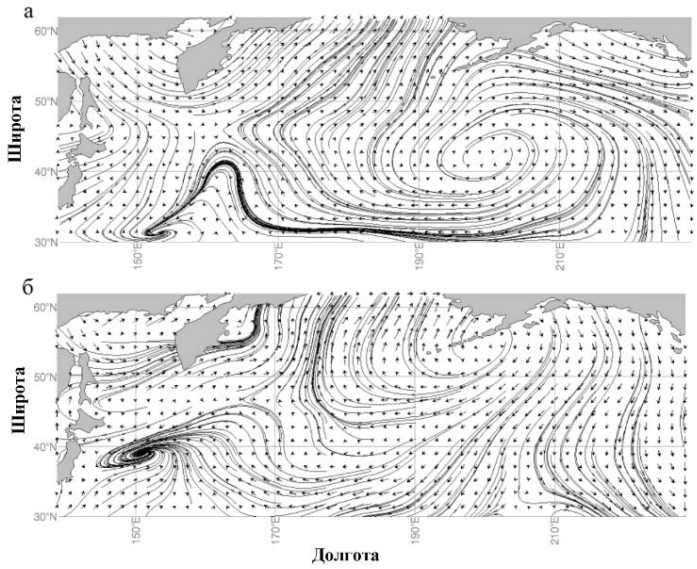


Рис. 114. Аномалии ветрового напряжения в 1955–1976 гг. (*а*) и 1977–2000 гг. (*б*)

Публикации:

Кириченко К.Е., Белоусова Е.П. Особенности изменений теплосодержания океана во внетропической части Тихого океана // Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования»: Материалы. Севастополь, 2016. С. 299–304.

3.5.3. Анализ влияния различных факторов на наблюдаемые изменения пространственной структуры отклика тропосферы на вариации геомагнитной активности

В 2016 г. показано, что повышение уровня солнечной активности приводит к возрастанию приземной температуры воздуха (ПТВ) в одних областях и уменьшению в других, что обусловлено особенностями климатической системы. Наблюдаемая пространственная структура отклика закономерно изменялась в рассматриваемый период. Установлено, что пространственная структура отклика ПТВ на геомагнитную активность зависит от годового хода геомагнитной активности. В периоды повышенной геомагнитной активности в весенний сезон (рис. 115, *а*, *б*) наблюдалось понижение ПТВ в восточной части Тихого океана на высоких и низких широтах. При этом ПТВ в западной части на средних широтах возрастала. При по-

вышенной геомагнитной активности в осенний сезон (рис. 115, *в*, *г*), наблюдалась противоположная картина. Отмечено, что в годовом ходе геомагнитной активности на фазе роста четных циклов СА преобладал весенний максимум, а нечетных — осенний.

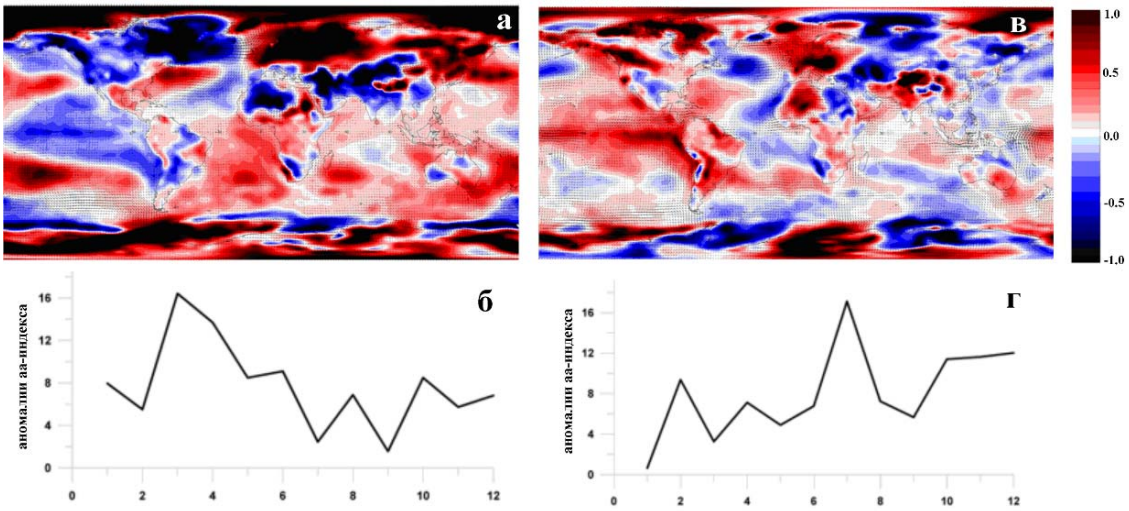


Рис. 115. Карты аномалий ПТВ относительно минимума СА (*а*, *в*) и годовой ход аномалий геомагнитной активности (*аа*-индекс) (*б*, *г*) на фазе роста СА: в периоды повышенной геомагнитной активности в весенний сезон (*а*, *б*); в периоды повышенной геомагнитной активности в осенний сезон (*в*, *г*)

Публикации:

1. Vasil'eva L.A., Molodykh S.I., Kovalenko V.A. Spatial structure of connection between the troposphere heat content and variations in solar and geomagnetic activities // Sun and Geosphere, 2016. V. 11, N 1. P. 55–59. http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO//00SGArhiv/ SG_v11_No1_2016-pp-55-59.pdf

2. Молодых С.И. Закономерности изменения пространственной структуры отклика ПТВ на вариации геомагнитной активности // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Международного симпозиума. Конференция D «Физика атмосферы и климат». Электронный ресурс. Томск: Издательство ИОА СО РАН. 2016. С. D290-D293. http://symp.iao.ru/files/symp/aoo/22/Section%20D.pdf

3.5.4. Статистический анализ динамики воздушных масс внетропических циклонов при разных геомагнитных условиях

Анализ динамики вертикального профиля температуры теплого и холодного секторов внетропических циклонов Северного и Южного полушарий, проведенный по данным NCEP/NCAR reanalysis, выявил отличия в изменении температурных свойств воздушных масс при их перемещении в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях (рис. 116). Обнаружено, что в спокойных геомагнитных условиях происходит заполнение циклона, при котором теплая воздушная масса день за днем охлаждается, а холодная прогревается. Во время возмущений создаются условия, которые приводят к повышению температуры в теплой воздушной массе, при этом холодная воздушная масса прогревается медленнее.

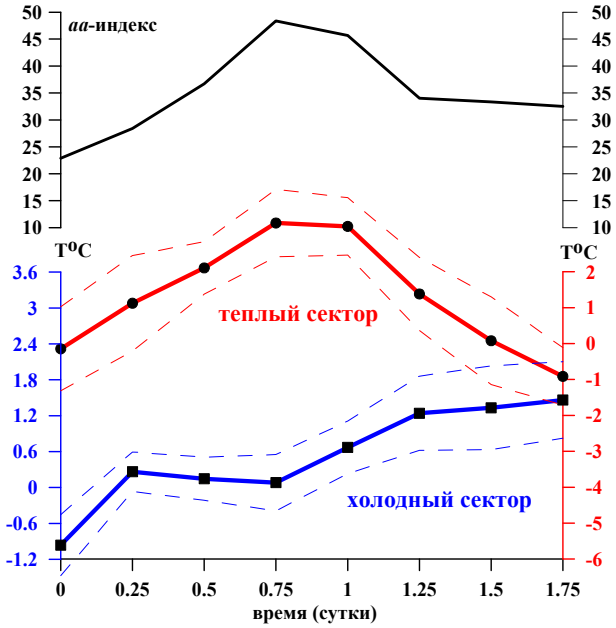


Рис. 116. Аномалии температуры относительно средней для сектора данного циклона в теплом и холодном секторах внетропического циклона

Отклик температуры тропосферы в теплом и холодном секторах циклона на изменение геомагнитной активности увеличивается с высотой, т. е. вертикальный профиль температуры меняется вследствие изменений геомагнитной активности. Наблюдаемое сохранение температурного градиента между секторами в циклоне является необходимым условием для увеличения интенсивности и продолжительности жизни циклона, что, в свою очередь, приведет к изменениям в системе крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Публикации:

1. Караханян А.А., Молодых С.И. Эволюция внетропических циклонов при разных внешних условиях // Международная научная конференция «Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы»: Труды. Москва, 16–18 мая 2016 г., 2016. С. 227–232. http://atmospheric-circulation.ru/konferenciya-2016/konferenciya-2016-trudy-konferencii/. http://elibrary.ru/item.asp?id=27311618.

2. Караханян А.А., Молодых С.И. Эволюция внетропических циклонов во время возмущенных геомагнитных условий // Геомагнетизм и аэрономия (направлена в печать).

3. Караханян А.А., Молодых С.И. Статистический анализ циклогенеза внетропических широт во время геомагнитных возмущений // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016»: Труды. Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2016. С. 145–148. http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2016/conf_2016.pdf

3.5.5. Исследование связи внезапных стратосферных потеплений (ВСП) с возмущениями, приходящими из тропиков, эпизодами Madden-Julian oscillation (MJO), планетарными волнами. Изучение природы крутильных колебаний и их связи с ВСП и MJO

По данным NCEP/NCAR Reanalysis исследованы долговременные изменения стационарных волн Россби в атмосфере Северного полушария. Установлено, что в зимний период стационарные волны в умеренных и высоких широтах устойчивы и имеют высокую амплитуду. Видимо, главным фактором их формирования в этот период является орография. Долговременные изменения стационарных волн лучше выражены летом. Общей особенностью изменения конфигурации стационарных волн как зимой, так и летом, является

увеличение зональных размеров аномалий барического поля и сокращение меридиональных, что указывает на усиление роли зонального переноса в атмосфере.

Существенно изменилась вертикальная структура стационарных волн в умеренных и высоких широтах. На рис. 117 приведены усредненные за десятилетние периоды среднемесячные распределения аномалий высоты изобарической поверхности вдоль широтного круга 60° N в июле. Видно, что в 1960–1970 гг. летом аномалии давления вдоль 60° N имели дипольную структуру: все восточное полушарие было занято положительной аномалией геопотенциала, западное — отрицательной. Меридиональные потоки были невелики и достигали максимальных значений вблизи нулевого меридиана и 180º E. В 1970–1980 гг. сильные изменения произошли над северной частью Тихого океана. Отрицательные аномалии появились в области долгот 150–180° E, положительные — в интервале 110–170° W. В 2000–2010 гг. эти аномалии представляли уже одну из главных особенностей распределения барического поля. Если в первое десятилетие структура барического поля обеспечивала в северной части Тихого океана меридиональные переносы тепла и количества движения с севера на юг, то в последние десятилетия эти переносы сместились к западу и востоку, а вдоль линии перемены дат установился перенос в направлении с юга на север. При этом возросли скорости переносов.

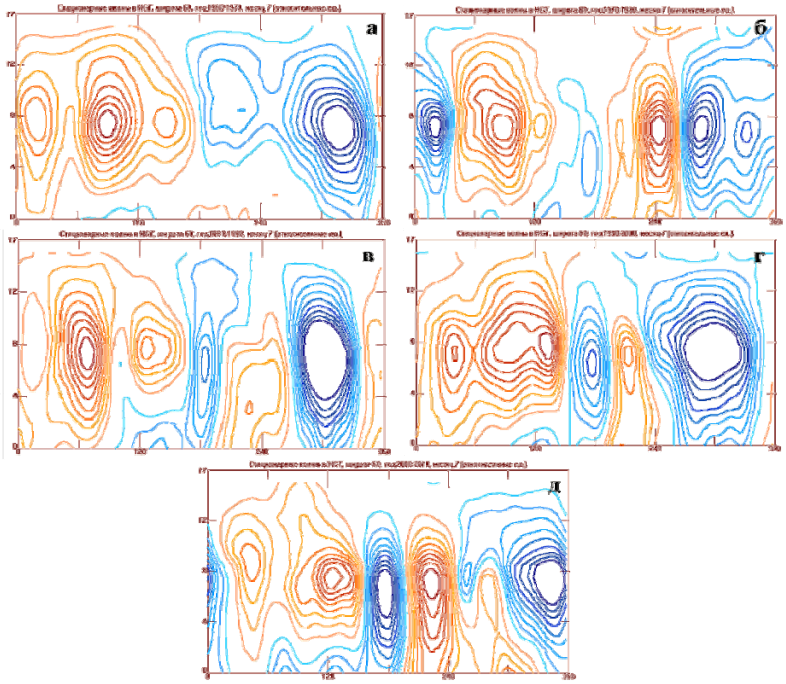


Рис. 117. Вертикальная структура стационарных волн в распределении аномалий высоты изобарической поверхности вдоль широтного круга 60° N в июле 1960–1970 (*а*), 1970–1980 (*б*), 1980–1990 (*в*), 1990-2000 (*г*), 2000–2010 гг. (*д*). По вертикали отложены номера уровней 1000, 925, 850, 700, 600, 500,400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 гПа; по горизонтали – долгота от 0 до 360°. Нанесены изолинии относительных значений аномалий от –0.9 до +0.9

В зимний период изменения барического поля в большей степени затронули Северную Атлантику (рис. 118). В 1960–1970 гг. аномалии барического поля к востоку и западу от нулевого меридиана имели разные знаки. В верхней тропосфере и нижней стратосфере аномалии барического поля были положительны, в верхней стратосфере отрицательны. В следующие десятилетия в западной и восточной частях этих образований положительные аномалии барических полей усиливались и вытягивались в верхние слои стратосферы. В 2000–2010 гг. все аномалии приняли вид одинаковых по форме наклонных структур с максимумом в верхней стратосфере. Наклон этих структур указывает на волновое распространение энергии в стратосферу, причем структура волн практически не меняется при пересечении тропопаузы.

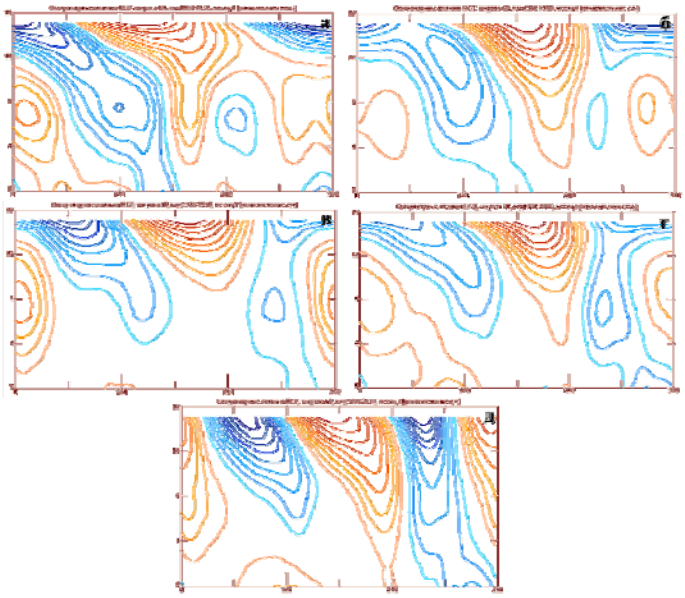


Рис. 118. Вертикальная структура стационарных волн в распределении аномалий высоты изобарической поверхности вдоль широтного круга 60° N в январе 1960–1970 (*а*), 1970–1980 (б), 1980–1990 (*в*), 1990–2000 (*г*), 2000–2010 гг. (*д*)

Публикации:

1. Мордвинов В.И., Латышева И.В. Теория общей циркуляции атмосферы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. ISBN 978-5-9624-1293-1. 134 с. http://elibrary.ru/item.asp?id=26059082.

2. Мордвинов В.И. Долговременные вариации изменчивости циркуляции атмосферы по типизации Дзердзеевского и данным архива NCEP/NCAR Reanalysis // Международная научная конференция «Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы»: Труды. Москва, 16–18 мая 2016 г. 2016. С. 49–53. http://atmospheric-circulation.ru/konferenciya-2016/konferenciya-2016-trudy-konferencii/. http://elibrary.ru/item.asp?id=27311618.

3.5.6. Исследование особенностей вариаций мезосферной эмиссии атомарного кислорода OI 557.7 нм в 24-м солнечном цикле

Как продолжение и обобщение исследований, выполненных на предыдущих этапах проекта в 2011–2015 гг., проведен анализ сезонного хода эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм (высоты высвечивания ~85–115 км), полученного за 20-летний период наблюдений (1997–2016 гг.), охватывающий два последних (23-й и 24-й) солнечных цикла. Исследования основаны на данных наблюдений в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E). В настоящее время принято считать, что вариабельность характеристик излучения верхней атмосферы, включая сезонный ход эмиссий атмосферных составляющих, во многом определяется общей циркуляцией на высотах мезосферы. Определенный вклад в наблюдаемые вариации атмосферных эмиссий вносят изменения солнечной активности и динамические процессы в нижней атмосфере. В этом случае наблюдаемые особенности сезонного хода атмосферной эмиссии 557.7 нм и его вариабельность могут отражать изменения в верхней атмосфере, связанные с многолетними вариациями в нижней атмосфере, солнечной активностью и климатическими изменениями.

В результате выполненных исследований получены следующие результаты.

1. Выявлено качественное подобие сезонного хода эмиссии 557.7 нм, полученного по наблюдениям в регионе Восточной Сибири в 1997–2016 гг., и сезонного хода данной эмиссии на некоторых среднеширотных станциях Северного полушария, полученных во второй половине прошлого века. Отличие заключается в менее выраженном в Восточной Сибири летнем максимуме и экстремально низком значении интенсивности эмиссии 557.7 нм в апреле.

2. Сопоставление сезонного хода эмиссии 557.7 нм в двух солнечных циклах (рис. 119) показало большие значения среднемесячных значений эмиссии 557.7 нм в летние и зимние месяцы в 23-м цикле, имевшем более высокий уровень солнечной активности, по сравнению с аналогичными месяцами в 24-м солнечном цикле.

3. По данным наблюдений в 1997–2016 гг. значимые коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями интенсивности эмиссии 557.7 нм и индексом солнечной активности *F*10.7 получены только для осенних и зимних месяцев. Это согласуется с выводами работы [1] о снижении зависимости эмиссии 557.7 нм от солнечной активности в летние месяцы.

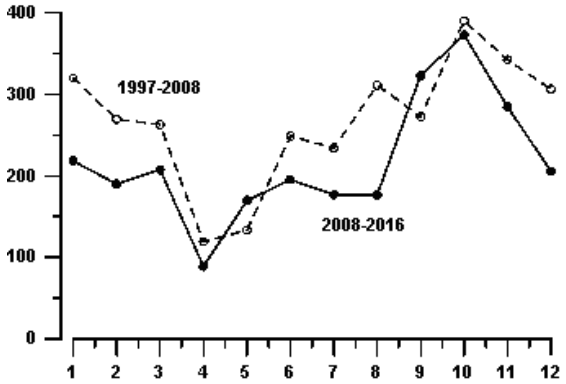


Рис. 119. Сезонный ход эмиссии 557.7 нм в 23-м (штриховая линия) и 24-м (сплошная линия) солнечных циклах по данным наблюдений в ГФО ИСЗФ СО РАН

Публикации:

Михалев А.В. Особенности сезонного хода атмосферной эмиссии 557.7 нм в регионе Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана (направлена в печать).

3.5.7. Анализ изменчивости ионосферы в спокойных геомагнитных условиях по данным наклонного зондирования

В 2016 г. продолжены начатые на предыдущем этапе проекта работы по статистическому анализу данных наклонного зондирования на трассах Магадан–Иркутск, Хабаровск–Иркутск и Норильск–Хабаровск, полученных в 2005–2014 гг. (интервал зондирования 5 и 15 мин). По вариациям величины максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) односкачковой моды, которая формируется областью ионосферы вблизи средней точки трассы, можно судить о вариациях изменчивости ионосферы в этой области. Изменчивость вариаций МНЧ оценивалась по абсолютным и относительным отклонениям текущих значений от их медианных величин (δ_{im}), текущих значений от усредненных за два часа (δ_{io}) и усредненных значений от медианы (δ_{om}). Рассчитывались среднеквадратичные отклонения (СКО) указанных величин.

На предыдущем этапе выполнения проекта было показано, что среднемесячные СКО изменчивости МНЧ односкачковой моды на всех трассах незначительно отличаются друг от друга; основной вклад в дневные вариации изменчивости вносят короткопериодные вариации и вариации ото дня ко дню, в то время как в ночные часы изменчивость в основном обусловлена длиннопериодными вариациями. Распределение отклонений имеет четко выраженный сезонный ход: зимой отклонения больше, чем летом.

В 2016 г. проведен анализ данных СКО изменчивости МНЧ односкачковой моды по дням. Отмечено, что в спокойных геомагнитных условиях в отдельные дни зимой наблюдается увеличение их значений на 30–50 % по сравнению со среднемесячными, причем этот рост отмечен сразу на трех трассах. Можно предположить, что это обусловлено крупномасштабными процессами, например, генерацией внутренних гравитационных волн во время стратосферных потеплений. На рис. 120 приведены вариации температуры в стратосфере (вблизи Иркутска) в январе–феврале 2011 г. и рассчитанные величины СКО

для этого интервала. Можно выделить области одновременного роста СКО, рассчитанного на трех трассах, который отмечался спустя несколько дней после наблюдаемого увеличения стратосферной температуры.

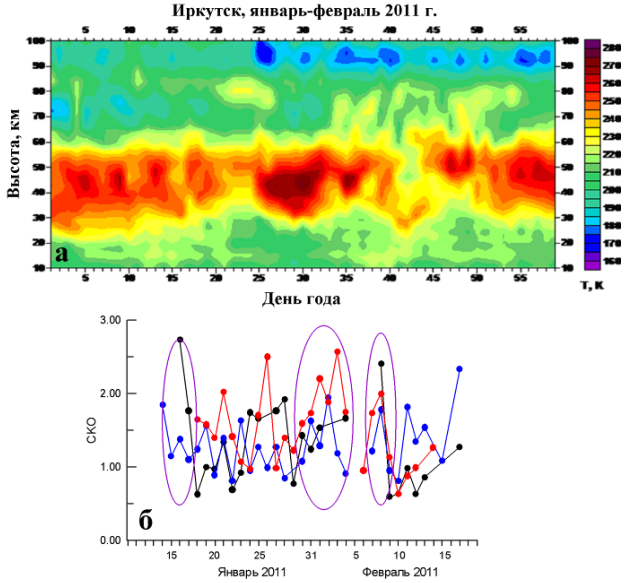


Рис. 120. Вариации стратосферной температуры (*а*) и среднеквадратичных отклонений на трех трассах (*б*) в январе–феврале 2011 г.: черная линия — трасса Норильск–Иркутск, синяя — Магадан-Иркутск, красная — Хабаровск–Иркутск. Отмечены области одновременного увеличения СКО относительно их средних величин

Публикации:

Полех Н.М., Иванова В.А., Черниговская М.А. Изменчивость ионосферы над Восточной Сибирью по данным наклонного зондирования // 14-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тезисы докл. Москва, ИКИ РАН, 14–18 ноября 2016 г. Электронный ресурс. 2016. http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5743.

3.5.8. Оценка вкладов солнечной и геомагнитной активности в регулярные вариации ионосферных параметров

На основе данных среднеширотных ионозондов (Иркутск, Калининград, Москва) проведено исследование влияния солнечной и геомагнитной активности на зимние дневные медианные значения максимума электронной концентрации N_mF2. Традиционно считается, что медианные значения N_mF2 хорошо аппроксимируются линейной зависимостью от индекса солнечной активности F10.7 (усредненного). Однако анализ недавних данных выявил следующий парадокс: для всех станций январские медианные значения N_mF2 были больше в 2015 г., чем в 2014 г., тогда как солнечная активность была выше в 2014 г. Возможной причиной было то, что геомагнитная активность была выше в 2015 г. (усредненный по 27 дням индекс геомагнитной активности A_p был примерно в два раза выше в 2015 г., чем в 2014 г.). Для проверки этой гипотезы были построены двойные линейные регрессии 27-дневных медианных значений N_mF2 на F10.7 и A_p (с усреднением по 27 и 81 дню). Результаты двойной линейной регрессии (рис. 121) показали, что парадокс 2014–2015 гг. действительно можно объяснить влиянием геомагнитной активности — ошибка двойной линейной регрессии в ~2–4 раза меньше по сравнению с ошибкой линейной регрессии на F10.7. Полученный предварительный результат означает актуальность учета как солнечной, так и геомагнитной активности в эмпирических ионосферных моделях медианных ионосферных параметров.

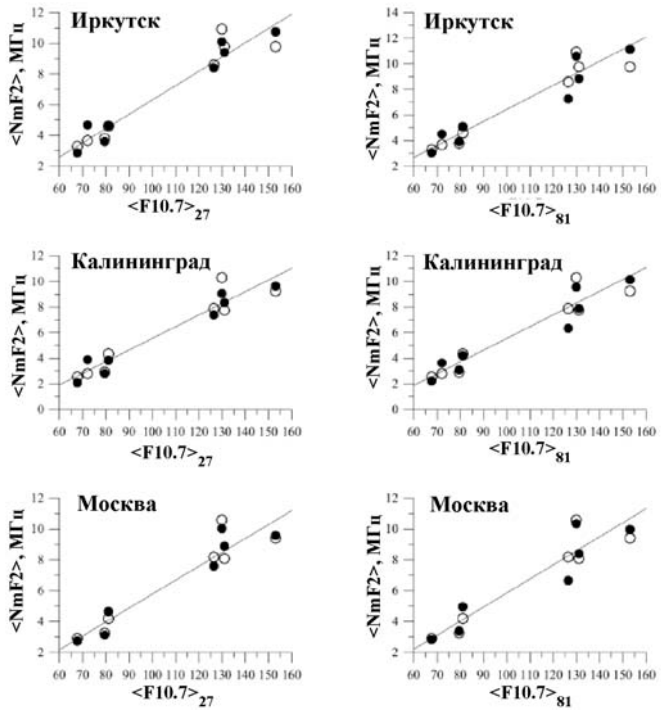


Рис. 121. Зависимости от солнечной активности 27-дневных медианных значений N_mF2 для 15 января 2008–2015 гг. ($<N_m F2>_{27}$): белые кружки — наблюдения; прямые линии — результаты линейной регрессии на $F10.7$; черные кружки — результаты двойной линейной регрессии на $F10.7$ и A_p. Слева — усреднение $F10.7$ по 27 дням, справа — по 81 дню

Публикации:

1. Markov A.V., Abdullaev A.R., Klimenko M.V., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Leshchenko V.S., Vesnin A.M. N_mF2 dependence from solar and geomagnetic activity in the middle latitudes in January 2012–2015 // V International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”: Proc. Kaliningrad. 2016. P. 165–170. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

2. Abdullaev A.R., Klimenko M.V., Markov A.V., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Leshchenko V.S., Panchenko V.A. Linear and dual linear regression model of mid-latitude daytime N_mF2 dependence from solar and geomagnetic activity // V International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”: Proc. Kaliningrad. 2016. P. 427–430, http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

3. Klimenko M.V., Korenkova N.A., Leshchenko V.S., Markov A.V., Abdullaev A.A., Ratovsky K.G., Vesnin A.M. Daytime N_mF2 anomalous dependence from solar activity in the middle and subauroral latitudes in January 2012–2015 // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”: Proc. Apatity. 2016. P. 97–100. http://pgia.ru:81/seminar/archive/2016/5_ionosphere/m_klimenko_%D1%86%D0%B2_p97-100.pdf.

3.5.9. Исследование процессов в системе термосфера–ионосфера во время геомагнитных возмущений и в спокойных условиях для длительного периода 2003–2013 гг. на основе данных измерений дигизондов на станциях Иркутск и Норильск

В продолжение работ, начатых в рамках проекта в 2011–2015 гг., рассчитаны и исследованы долговременные сезонные изменения относительных величин основных газовых составляющих термосферы [O]/[N2] и [O2]/[O] в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях для длительного периода 2003–2013 гг. на базе данных Норильского дигизонда. Оценки выполнены по методике авторов и по данным Норильского дигизонда на высотах ниже максимума ионосферного слоя F1. Установлено (рис. 122), что [O2]/[O] в спокойных и в возмущенных условиях к концу 2013 г. уменьшается во все сезоны от 10 до

20 % по отношению к значениям 2003 г., в то время как для отношения [O]/[N2] наблюдается увеличение к 2013 г. (до 17 %). Получено вполне приемлемое соответствие между нашими средними отношениями [O]/[N2] и аналогичными величинами, рассчитанными по картам, построенным на основе измерений УФ-спектрометра GUVI. Карты обеспечивают дневное глобальное покрытие земной мезосферы и нижней термосферы (высоты 60–180 км). Сравнение было проведено для летних сезонов 2003, 2007 и 2011 г.

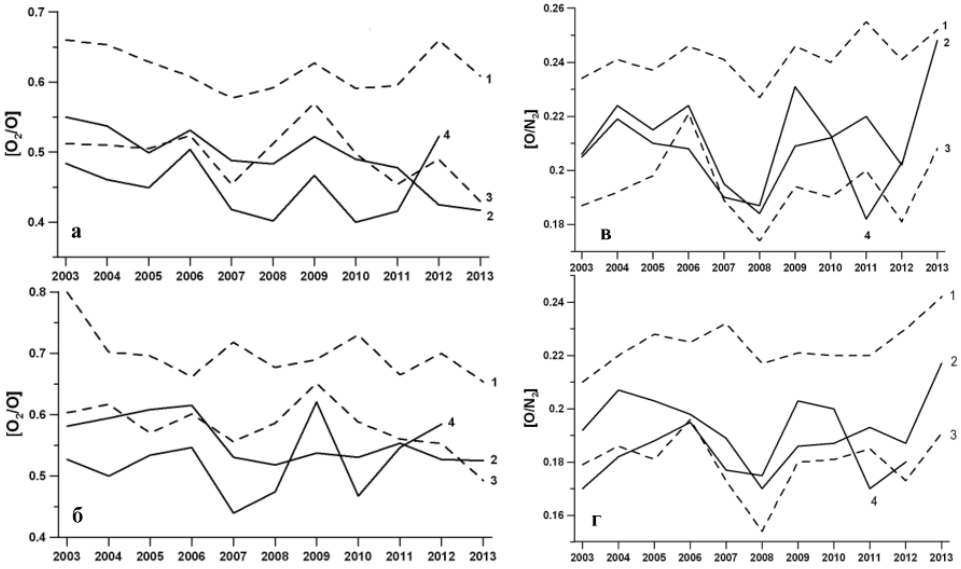


Рис. 122. Долговременные изменения средних значений [O2]/[O] (*а*, *б*) и [O]/[N2] (*в*, *г*) в спокойных (*а*, *в*) и возмущенных (*б*, *г*) условиях для разных сезонов: 1 — зима, 2 — весна, 3 — лето, 4 — осень

Проведен анализ сезонного влияния геомагнитных возмущений на электронную концентрацию N_e на высотах F1-слоя в период 2003–2015 гг. по данным ионосферной станции Иркутск. Для весенних и осенних сезонов были исследованы восемнадцать геомагнитных событий. Проанализированы изменения N_e на высотах 150–190 км по данным дигизонда на станции Иркутск. Обнаружена весенне-осенняя асимметрия эффектов геомагнитных бурь на этих высотах. Имело место незначительное изменение плотности электронов во время весенних геомагнитных бурь, в то время как осенью наблюдалось существенное уменьшение N_e на высоте 190 км (рис. 123).

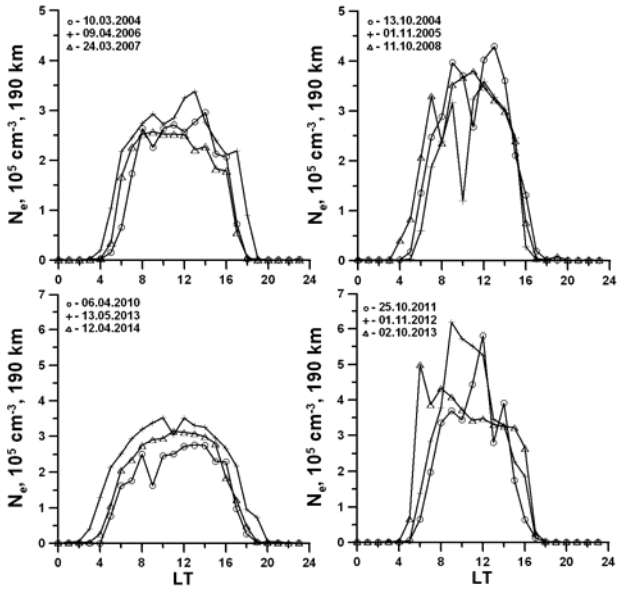


Рис. 123. Дневное поведение электронной концентрации N_e на высоте 190 км в дни максимального развития весенних (слева) и осенних (справа) геомагнитных бурь

Публикации:

1. Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Атмосфера над Норильском в период 2003–2013 гг. // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Конференция D «Физика атмосферы и климат»: Материалы. Электронный ресурс. Томск: Издательство ИОА СО РАН. 2016. С. D318–D321. http://symp.iao.ru/files/symp/aoo/22/Section%20D.pdf

2. Яковлева О.Е. Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Весенне-осенняя асимметрия в геомагнитных возмущениях в период подъема солнечной активности (2010–2015 гг.) на высотах ионосферного слоя F1 (ст. Иркутск) // XII Международная школа молодых ученых им. А.Г. Колесника, посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований (Физика окружающей среды): Материалы. Томск, 3–8 июля, 2016. С. 200.

3. Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Атмосфера над Норильском в период 2003–2013 гг. // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 159. http://symp.iao.ru/ru/aoo/22/progpdf.

4. Kushnarenko G.P., Yakovleva O.E., Kuznetsova G.M. The effects of geomagnetic disturbances at F1-layer heights during the lower and minimum of solar activity (2003–2009) at ionospheric station Irkutsk // 13th Russian Chinese Conference on Space Weather: Abstracts. Yakutsk, August 15–19, 2016. P. 25. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/files/Abstracts050816.pdf.

5. Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Долговременные изменения в нейтральном газовом составе термосферы над Норильском (2003–2013 гг.) // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 92–97—.

6. Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Эффекты геомагнитных бурь в слое F1 в разные периоды солнечной активности (ст. Иркутск) // Геомагнетизм и аэрономия. 2016 (направлена в печать).

3.5.10. Исследование взаимосвязи различных регионов ионосферы

Одна из проблем физики ионосферы — взаимосвязь различных регионов ионосферы. В ходе выполнения проекта предложен метод исследования этих связей с помощью технологии графов (сетей). Под сетью понимается набор взаимодействующих узлов, связанных между собой. В качестве экспериментальных данных использовались глобальные ионосферные карты полного электронного содержания (ПЭС) GIM лаборатории CODE и UPCg за 2005–2010 гг. Каждая карта GIM содержит значения абсолютного вертикального ПЭС в узлах сетки в диапазоне ±180° по долготе и ±87.5° по широте с разрешением 2.5° по долготе и 5° по широте. Карты строятся с двухчасовым временным разрешением. Для анализа взаимосвязи различных регионов ионосферы рассчитывалось отклонение среднесуточного значения ПЭС от среднегодового (аномалия ПЭС) в узлах карты GIM. В качестве критерия наличия связи между двумя узлами использовалось значение корреляции между соответствующими временными рядами аномальных значений ПЭС в данных узлах. Гистограмма значений максимумов кросскорреляционных функций (ККФ) аномалий ПЭС (рис. 124) показывает, что имеется основной максимум с высоким значением корреляции, обусловленный схожей ионосферной динамикой в различных регионах. Отрицательные значения максимумов ККФ соответствуют узлам в различных полушариях.

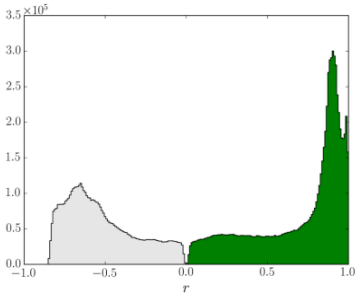


Рис. 124. Гистограмма максимумов кросскорреляционных функций аномалий ПЭС по данным UPCg

На рис. 125 цветом представлено число связей (deg) для каждого узла сети. Анализ числа связей позволяет выделить пять основных доменов ионосферы: три регулярных и два аномальных. Высокий уровень корреляции наблюдается между узлами на средних и высоких широтах в обоих полушариях, а также в приэкваториальной области. Кроме того, достаточно высокий уровень корреляции динамики ПЭС наблюдается для Северной Америки и Австралии в выделенных областях, внутри которых узлы достаточно сильно связаны, а связи с другими областями практически отсутствуют.

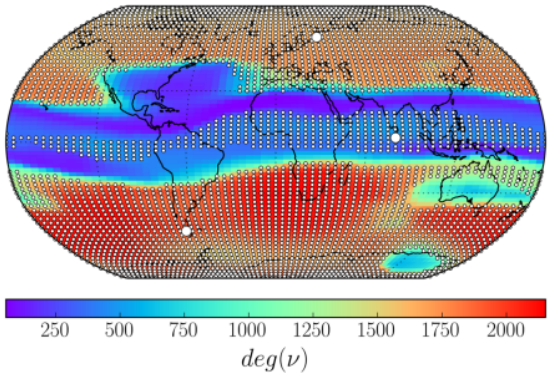


Рис. 125. Пространственное распределение количества связей (deg) для каждого из узлов сети. Большими белыми точками показаны узлы в трех регулярных доменах, а узлы, с которыми они связаны, отмечены маленькими точками

Публикации:

Zhivetiev I.V., Yasyukevich Yu.V. Using network technology for studying the ionosphere // V International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”: Proc. Kaliningrad. 2016. P. 237–240. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

3.5.11. Исследование интенсивности вариаций полного электронного содержания в различных географических регионах

3.5.11.1. Особенности суточных и долготных вариаций N_mF2 и ПЭС в условиях глубокого минимума солнечной активности

В рамках совместных научных исследований КФ ИЗМИРАН и ИСЗФ СО РАН проведено изучение суточных и долготных вариаций параметров системы ионосфера–плазмосфера, полученных с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП), ассимиляционной модели ионосферы IRI Real-Time Assimilation Mapping (IRTAM) и данных спутниковых и наземных наблюдений, для декабрьского солнцестояния в условиях глубокого минимума солнечной и геомагнитной активности 2009 г. Рассматривалось поведение электронной концентрации N_mF2 в максимуме слоя F2, соответствующей ей критической частоты f_oF2 F2-слоя, полного электронного содержания (ПЭС, TEC в английской транскрипции) ионосферы (рис. 126).

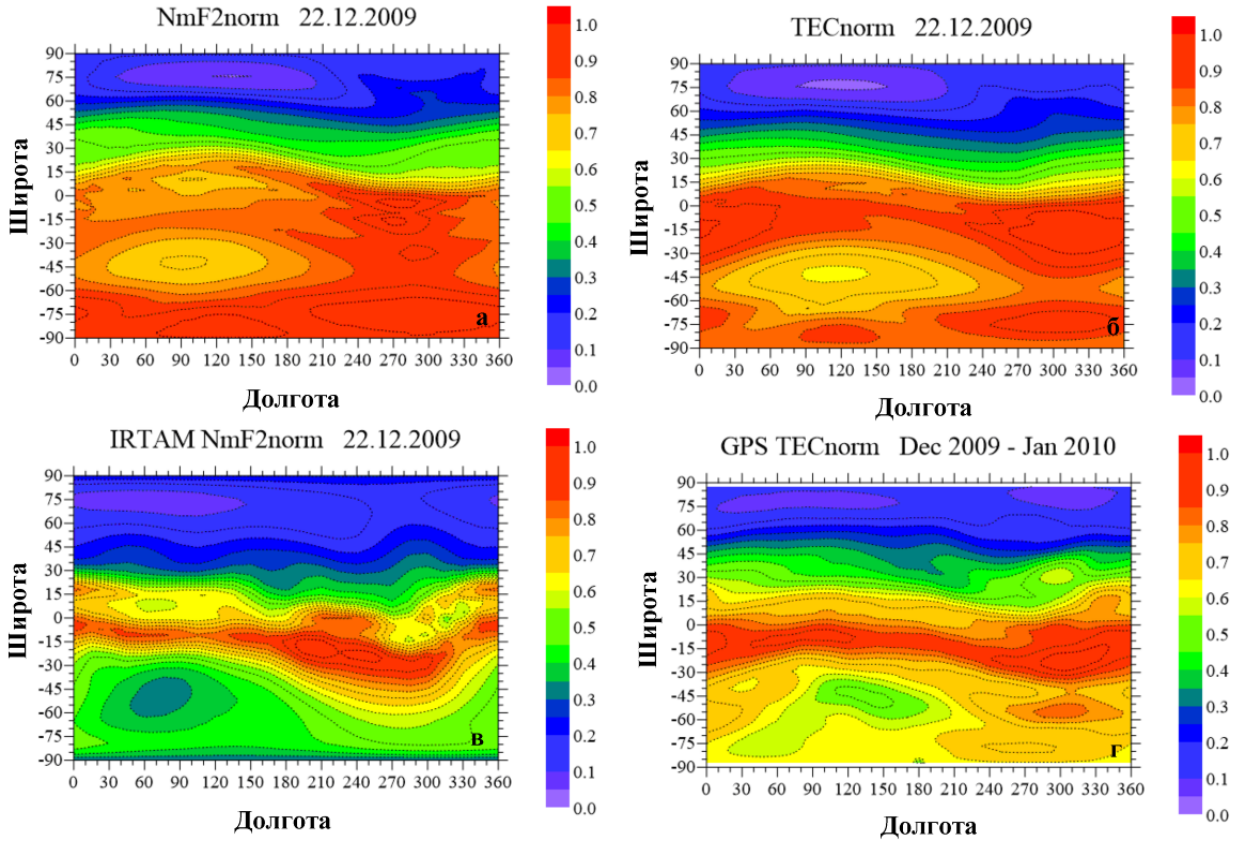


Рис. 126. Широтно-долготные вариации нормированных на максимум значений N_mF2 (*а*, *в*) и ПЭС (*б*, *г*), усредненные по времени за сутки. Вверху показаны результаты расчетов, полученные в модели ГСМ ТИП (*а*, *б*), а внизу — N_mF2 согласно модели IRTAM (*в*) и ПЭС по данным глобальной сети наземных приемников GPS сигналов (*г*). Все данные приведены для зимних условий в минимуме солнечной активности

Важнейшими результатами исследования являются следующие.

1. Долготные вариации ионосферных параметров сопоставимы по порядку величины с суточными вариациями везде за исключением области экваториальной аномалии. При этом на средних и высоких широтах Южного (летнего) полушария величины долготных и суточных вариаций наиболее близки.

2. Выявлены основные максимумы в долготно-широтном распределении ионосферных параметров для различных моментов местного времени. Согласно результатам расчетов моделей ГСМ ТИП и IRTAM и данным наблюдений спутников GPS, в американском долготном секторе на всех широтах Южного (летнего) полушария формируются максимумы f_oF2 и ПЭС, из которых выделяются приэкваториальный и высокоширотный максимумы.

3. Впервые получена оценка вклада в долготную вариацию различных секторов местного времени на разных широтах. В Южном (летнем) полушарии долготная вариация f_oF2 и ПЭС формируется в ночное время.

4. Выявлены факторы, вносящие наиболее значимый вклад в формирование долготных вариаций на различных широтах. Основной вклад в летнем Южном полушарии вносят аномалия моря Уэдделла и среднеширотная летняя вечерняя аномалия.

5. Сравнение вариаций в f_oF2 и ПЭС показало, что в целом они идентичны и в этом контексте взаимозаменяемы при построении эмпирических моделей этих параметров в спокойных геомагнитных условиях.

Публикации:

1. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Захаренкова И.Е., Веснин А.М., Ратовский К.Г., Галкин И.А., Черняк Ю.В., Ясюкевич Ю.В., Коренькова Н.А., Котова Д.С. Суточные и долготные вариации в ионосфере Земли в период солнцестояния в условиях глубокого минимума солнечной активности // Космические иссл. 2016, Т. 54, № 1. С. 10–22. http://elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0023420616010106.

2. Клименко В.В., Карпачев А.Т., Клименко М.В., Ратовский К.Г., Коренькова Н.А. Широтная структура долготного эффекта в ночной ионосфере в период летнего и зимнего солнцестояния // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 21–30. DOI:10.7868/S0207401X16010088. http://elibrary.ru/item.asp?id=25343802

3.5.11.2. Использование индекса усредненной интенсивности вариаций ПЭС W_{tec}

Разработанный на предыдущем этапе проекта индекс W_{tec} для оценки усредненной интенсивности вариаций ПЭС нашел применение в различных проектах и программах (проект РНФ №14-37-00027, проект РФФИ №16-35-50021_мол_нр) для оценки уровня возмущенности ионосферы. В частности, W_{tec} использовался для изучения зависимости сбоев определения ПЭС на станциях GPS/ГЛОНАСС в средне- и высокоширотных регионах от ионосферной возмущенности [2]. При этом было показано, что скорость роста плотности сбоев ПЭС при увеличении ионосферной возмущенности W_{tec} на высоких широтах примерно в 2–2.5 раза выше, чем на средних. И в средних, и в высоких широтах в летний период возрастание плотности сбоев ПЭС с ростом возмущенности W_{tec} происходит в 1.5 раза быстрее, чем в зимний.

Публикации:

Воейков С.В., Бернгардт О.И., Шестаков Н.В. Использование индекса возмущенности вертикальных вариаций ПЭС при исследовании ионосферных эффектов Челябинского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 2. С. 234–243. DOI:10.7868/S0016794016020127. http://elibrary.ru/item.asp?id=25769608.

3.5.11.3. Оценка возможности использования геостационарных спутников для исследования ионосферы

Развитие приемного оборудования и космических сегментов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также дополняющих их спутниковых систем дифференциальной коррекции (Satellite Based Augmentation System, SBAS) обеспечивает в настоящее время прием сигналов на двух рабочих частотах от ряда геостационарных спутников ГНСС и SBAS. Эти сигналы могут использоваться для оценки ПЭС в ионосфере, так же как сигналы спутников GPS/ГЛОНАСС. Основное преимущество использования геостационарных спутников заключается в том, что они обеспечивают возможность получения долговременных непрерывных рядов ПЭС в отличие от 2–8-часовых рядов в случае GPS и ГЛОНАСС. В связи с этим представляет интерес качество оценок (уровень шума) ПЭС, получаемых с помощью геостационарных спутников.

В отчетный период проведено сравнение уровня шума при оценке ПЭС с использованием геостационарных спутников китайской ГНСС Beidou и таких SBAS, как американская WAAS, европейская EGNOS, индийская GAGN. На рис. 127 в качестве примера показан уровень шумов при оценке ПЭС с использованием геостационарных спутников GAGAN и Beidou.

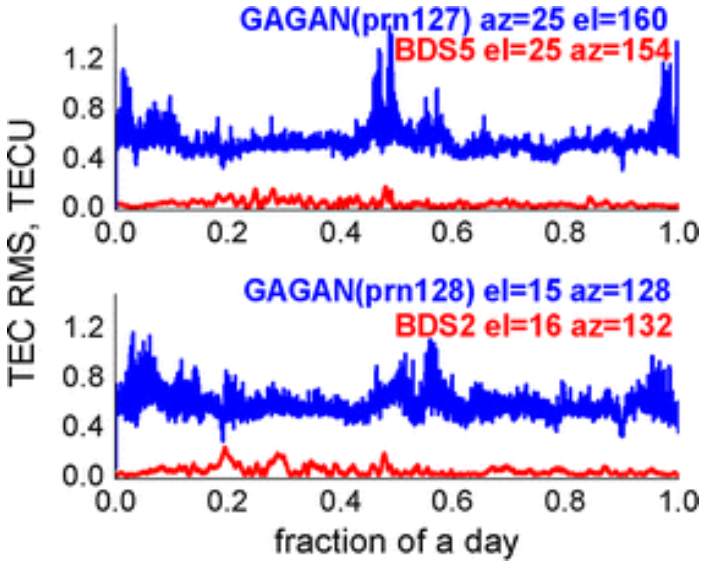


Рис. 127. Сравнение уровня шумов при оценке ПЭС с использованием геостационарных спутников GAGAN и Beidou (BDS)

Анализ уровня шумов показал, что наиболее предпочтительно использование данных геостационарных спутников ГНСС Beidou. Они обеспечивают уровень шума до 0.2 TECU, что сравнимо с уровнем шума при определении ПЭС по данным GPS/ГЛОНАСС на тех же углах места. Оценки ПЭС, полученные по данным SBAS GAGAN и WAAS более зашумлены: уровень шума может достигать 1.5 TECU при среднем значении ~0.7 TECU. Использование данных SBAS EGNOS для оценок ПЭС неприемлемо из-за высокого уровня шума (до 15 TECU, при среднем значении 5 TECU)

На рис. 128 показана возможность получения длительных рядов ПЭС с использованием геостационарного спутника WAAS в различных широтных регионах. Анализ проведен для сильнейшей магнитной бури 24-го цикла солнечной активности, зарегистрированной 17 марта 2015 г. Полученные с использованием геостационарных спутников данные позволяют выявить особенности динамики ионосферы в различных регионах: на главной фазе бури в приэкваториальных областях (станции LMMF, AREG) и на средних широтах (станция RGDG) наблюдался рост ПЭС (до 10–50 TECU) по сравнению со средним уровнем; на фазе восстановления бури на среднеширотной станции RGDG зарегистрировано уменьшение ПЭС, не проявившееся на приэкваториальных станциях.

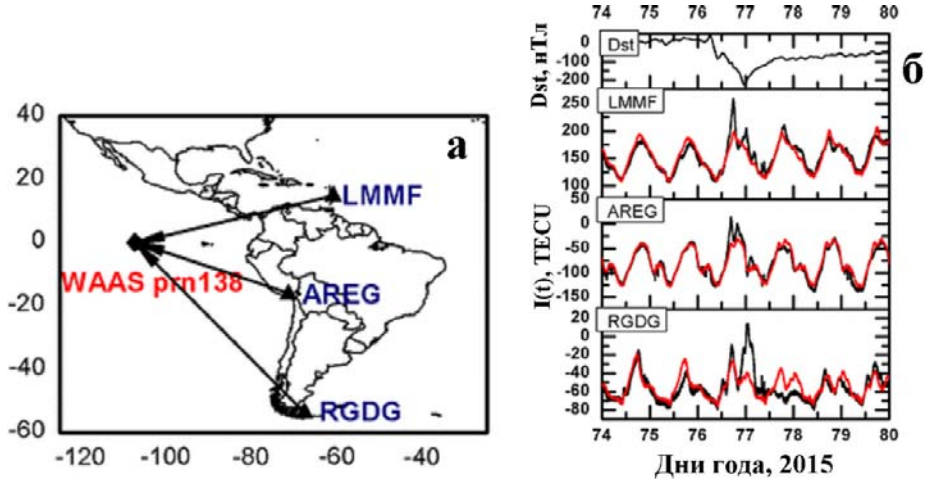


Рис. 128. Геометрия эксперимента по исследованию ионосферы с использованием геостационарного спутника WAAS (*а*), вариации геомагнитного индекса *Dst* и относительного наклонного ПЭС *I*(*t*) по данным спутника WAAS на различных станциях (*б*). Черные кривые — вариации ПЭС, красные — вариации ПЭС, усредненные за четыре предыдущих дня

Публикации:

1. Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., Yasyukevich Yu.V., Morozov Yu.V. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites // GPS Solutions. 2016. V. 20, N 4. P. 877–884. DOI: 10.1007/s10291-015-0500-2. http://link.springer.com/article/10.1007/s10291-015-0500-2.

2. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. Влияние магнитных бурь и суббурь на сбои навигационной системы GPS в высоких широтах // Космические иссл. 2016. Т. 54, № 1. С. 23–33. http://elibrary.ru/item.asp?id=25341100.

3. Kurbatov G.A., Padokhin A.M., Yasyukevich Yu.V., Berbeneva N.A. Studing ionospheric TEC with signals of geostationary navigation and augumentation satellites // V International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”: Proc. Kaliningrad. 2016. P. 448–451. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

Список использованных источников:

1. Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н. Сезонные вариации зависимости эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм от солнечной активности и многолетнего тренда // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 4. С. 557–562.

2. Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Полякова А.С., Воейков С.В., Захаров В.И., Перевалова Н.П., Титков Н.Н. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. (Принята в печать).

3.6. Исследование системы литосфера–атмосфера–ионосфера в экстремальных условиях

3.6.1. Проведение координированных измерений параметров атмосферы, ионосферы, геомагнитного поля в Байкальском регионе и пополнение банков геофизических данных

В 2016 г. выполнены координированные измерения параметров атмосферы, ионосферы, геомагнитного поля в Байкальском регионе в периоды наиболее сильных сейсмических событий, зарегистрированных в этом регионе.

В Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E) проводилась регистрация собственного излучения верхней атмосферы Земли в линиях атомарного кислорода OI 557.7 нм (максимум высоты высвечивания ~97 км) и 630 нм (~250 км), натрия NaI 589.0–589.6 нм (~92 км) с помощью спектрографа SATI, изготовленного на базе модернизированного спектрографа ИСП-51 с регистрацией спектров на камеру «Видеоскан-285» с ПЗС-матрицей SONY ICX285AL (http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/spectr).

В ГФО ИСЗФ СО РАН выполнены также измерения ионосферных параметров с помощью высокоскоростного ЛЧМ-ионозонда, который представляет собой инструмент нового поколения, позволяющий получать высококачественные данные в диапазоне частот 1.5–15 МГц. Измерения проводятся с временным разрешением 1 мин. Это позволяет использовать данные для детального изучения вертикальных ионосферных возмущений, вызванных сейсмическими волнами.

На сети SibNET наземных приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), действующей в Байкальском регионе, выполнены групповые и фазовые измерения с частотой 1 Гц. Сеть организована ИСЗФ СО РАН в 2012 г. и объединяет семь измерительных пунктов, размещенных в обсерваториях ИСЗФ СО РАН в Прибайкалье. Измерительные пункты сети оснащены ГНСС-приемниками Delta-G3T и SigmaQ-G3D компании Javad GNSS, которые обеспечивают регистрацию сигналов GPS, ГЛОНАСС, а также некоторых спутниковых систем дифференциальной коррекции (SBAS).

В магнитных обсерваториях ИСЗФ СО РАН (Магнитная обсерватория «Иркутск», Байкальская магнитотеллурическая обсерватория, Норильская комплексная магнитно-ионосферная станция) проводился непрерывный мониторинг переменного магнитного поля Земли в различных диапазонах частот.

Полученные данные пополнили банки данных магнитных вариаций, оптических наблюдений, ионозондовых измерений и измерений на приемниках ГНСС. Выполнен предварительный анализ полученных данных.

Проведена работа по совершенствованию методов измерений и обработки данных. На основе магнитных данных предложены методы мониторинга динамики активных областей вдоль авроральной зоны по наблюдениям геомагнитных пульсаций. Выполнена государственная регистрация программы для ЭВМ, предназначенной для управления и сбора данных с двухчастотного ГНСС-приемника Javad Delta-G3T в операционной системе (ОС) Linux через интерфейсы USB и RS-232. Программа реализована в виде консольного приложения ОС Linux и может выполняться как в интерактивном, так и пакетном режимах. Программа обеспечивает: установку параметров измерений, получение данных измерений с заданной частотой дискретизации, контроль целостности полученных данных, исправление последствий технических сбоев в данных, запись данных в файлы на жесткий диск компьютера в формате JPS (описание формата файлов JPS и команд ГНСС-приемников Javad Delta приведены фирмой JAVAD GNSS Inc. в руководстве GREIS: GNSS Receiver External Interface Specification, Version 3.2.0, 2010 на сайте www.javad.com).

3.6.2. Реакция ионосферы на первый на запуск ракеты с космодрома Восточный

28 апреля 2016 г. в 05:01 по московскому времени (02:01 UT) первая ракета-носитель (РН) успешно стартовала с нового российского космодрома Восточный (http://www.roscosmos.ru), открыв новую страницу в истории отечественной космонавтики. В результате первого запуска РН «Союз-2.1а» вывела на орбиту три спутника, разработанных в российских университетах. В рамках проекта с помощью сигналов глобальных навигационных систем GPS, ГЛОГНАСС проведена регистрация возмущений в ионосфере, вызванных первым запуском РН.

Использовались данные всех ГНСС-станций, входящих в Международную сеть IGS (International GNSS Service) и расположенных в регионе космодрома Восточный (рис. 129): YAKT, YSSK, CHAN, PETS, MAG0, BILB, TIXI, NRIL, IRKJ, BADG. Данные этих станций получены на сайте аналитического центра SOPAC Международной сети IGS (http://sopac.ucsd.edu). Большинство указанных станций принимают только сигналы GPS. Прием сигналов GPS и ГЛОНАСС обеспечивают станции TIXI, IRKJ, BADG. По рис. 129 видно, что приемных станций ГНСС в районе космодрома Восточный немного. Однако за счет пространственного распределения лучей приемник – спутник ГНСС эти станции могут обеспечить регистрацию отклика ионосферы на запуск РН в любом направлении от космодрома.

На основе двухчастотных фазовых измерений ГНСС-приемников с помощью стандартной методики [1, 2] были рассчитаны и отфильтрованы в диапазоне периодов 01–10 мин вариации полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере. Пространственная привязка вариаций ПЭС проводилась с помощью расчета координат ионосферных точек (точек пересечения луча приемник – спутник ГНСС с тонким слоем на высоте h_{max} главного максимума ионизации), при этом h_{max}=300 км [1]. Траектории ионосферных точек отражают перемещение спутников GPS/ГЛОГНАСС. Вариации ПЭС в день запуска сравнивались с поведением ПЭС в предыдущий и последующий дни. Геомагнитная обстановка во время запуска была спокойной: 27–28 апреля индекс K_p не превышал 3, индекс *Dst* менялся от –12 до +10 (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp).

28 апреля в интервале 02:11–02:25 UT на нескольких лучах приемник – спутник ГНСС зарегистрированы характерные импульсные возмущения ПЭС (рис. 130). Период

зарегистрированных возмущений ПЭС варьировал от 2.5 до 11 мин со средним значением 6.5 мин. Амплитуда возмущений составляла 0.02–0.24 TECU, среднее значение амплитуды 0.08 TECU. Амплитуда превышала уровень фоновых флуктуаций в контрольные дни. Полученные характеристики близки аналогичным параметрам возмущений ПЭС, которые наблюдались во время более чем 40 запусков РН в 1998–2000 гг. с космодрома Байконур [1].

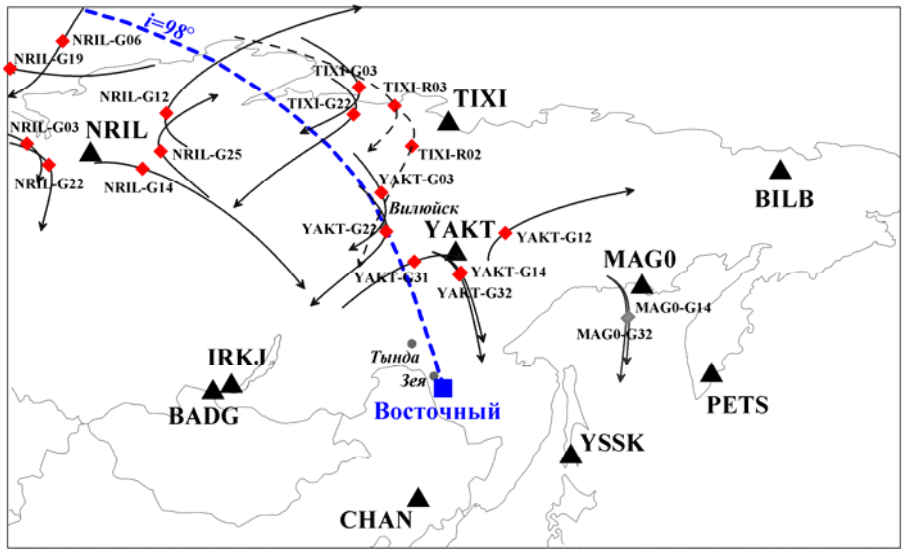


Рис. 129. Геометрия измерений во время первого запуска с космодрома Восточный 28 апреля 2016 г. Треугольниками отмечены станции GPS/ГЛОНАСС, линиями со стрелками — траектории ионосферных точек в 01:00–04:00 UT. Сплошные линии соответствуют спутникам GPS, штриховые — ГЛОНАСС. Толстой штриховой линией показана трасса выведения спутников с космодрома Восточный на орбиту с наклонением *I*=98° по данным [3]

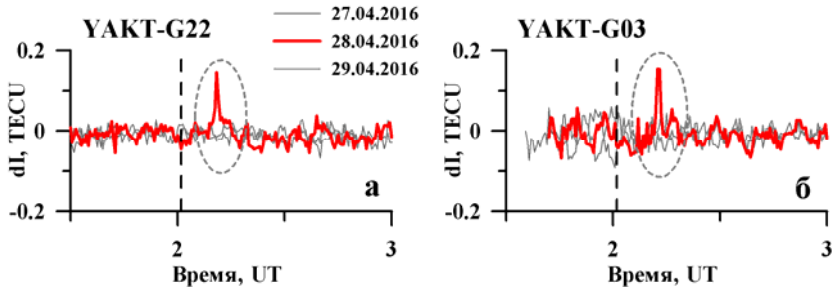


Рис. 130. Возмущения ПЭС на лучах приемник – спутник ГНСС YAKT-G22 (*а*), YAKT-G03 (*б*). Вертикальная штриховая линия — момент старта

Ромбами на траекториях ионосферных точек на рис. 129 отмечены положения, где зафиксированы колебания ПЭС, вызванные запуском РН «Союз-2.1а» (красные ромбы соответствуют возмущениям, зарегистрированным до 02:35 UT, серые — после этого времени). Рядом с ромбом указано название соответствующего луча: станция и номер спутника (YAKT-G22, TIXI-R21 и т. д., где G означает спутник GPS, R — спутник ГЛОНАСС). Первое возмущение ПЭС зарегистрировано на луче YAKT-G22 в 02:11 UT (через 10 мин после запуска) на расстоянии ~1400 км от места старта. Это согласуется с полученными ранее выводами [1, 2, 4–6] о том, что возмущения в ионосфере вызывает не старт, а сверхзвуковое движение ракеты на разгонном участке траектории на расстоянии не менее 500 км от стартовой площадки через 100–300 с после старта.

Большинство ионосферных откликов зарегистрировано к северо-западу от места старта (рис. 129), что свидетельствует о движении РН в северо-западном направлении. Данное направление соответствует траектории выведения спутников на орбиту с наклонением 98° [3] и подтверждается официальными сообщениями Госкорпорации «Роскосмос» об обнаружении фрагментов РН «Союз-2.1а» в заданных районах падения в Зейском и

Тындинском районах Амурской области и Вилюйском улусе Республики Саха (Якутия) (http://www.roscosmos.ru/22208, http://www.roscosmos.ru/22210).

Два возмущения ПЭС (на лучах MAG0-G32 и MAG0-G14, серые ромбы на рис. 129) зарегистрированы к северо-востоку от космодрома на значительном (более 1400 км) расстоянии от траектории I=98°. Однако данные возмущения наблюдались позже остальных (около 03:00 UT). Форма этих возмущений близка к форме колебаний ПЭС, зарегистрированных ранее на лучах YAKT-G32 и YAKT-G14. Это свидетельствует о том, что на лучах MAG0-G32 и MAG0-G14 наблюдается та же волна возмущения, дошедшая от траектории РН. Скорость распространения волны, рассчитанная по наблюдениям возмущений на лучах YAKT-G32/MAG0-G32 и YAKT-G14/MAG0-G14, составила 650 м/с, что хорошо согласуется с результатами предыдущих исследований [1, 2, 6].

Публикации:

1. Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П. Реакция ионосферы на запуск ракеты с космодрома Восточный // Докл. Академии наук. 2016. Т. 471, № 5. С. 586–589. DOI: 10.7868/S0869565216350231.

2. Перевалов А.А., Перевалова Н.П. Управление и сбор данных с двухчастотного ГНСС-приемника Javad Delta через интерфейсы USB и RS-232 в интерактивном и пакетном режимах в операционной системе Linux / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613942. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12 апреля 2016 г.

3.6.3. Исследование динамического и высотного состава неоднородностей верхней атмосферы, генерируемых при землетрясениях поверхностными сейсмическими волнами по большому объему экспериментальных данных

По данным ЛЧМ-ионозонда и GPS проведен совместный анализ динамики неоднородностей верхней атмосферы, генерируемых при землетрясениях поверхностными сейсмическими волнами. Анализ выполнен для 28 землетрясений 2011–2016 гг., которые имели максимальную амплитуду сейсмических колебаний в Байкальском регионе: логарифмическая амплитуда K_A этих событий по данным станции Талая (TLY) превышала 6. На рис. 131 показано распределение эпицентров указанных землетрясений.

По данным GPS исследовано поведение полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере во время 20 событий 2013–2016 гг. Возмущения ПЭС рассматривались вблизи эпицентров и в Байкальском регионе (дальняя зона). Вблизи эпицентров для 16 из 20 событий зарегистрированы возмущения ПЭС, вызванные землетрясением. Скорость распространения возмущений ПЭС (150–600 м/с) свидетельствует о том, что эти возмущения связаны с распространением внутренних атмосферных волн. В Байкальском регионе по данным GPS ни для одного из рассмотренных событий не удалось выделить возмущений ПЭС.

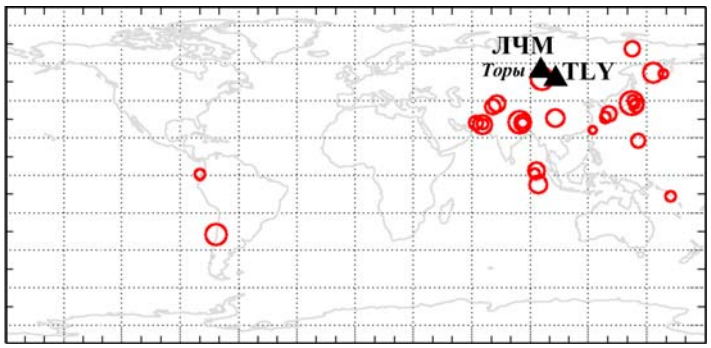


Рис. 131. Распределение эпицентров (окружности) землетрясений 2011–2016 гг., имевших максимальную амплитуду K_A сейсмических колебаний в Байкальском регионе. Радиус окружности соответствует K_A

По данным высокоскоростного ЛЧМ-ионозонда, расположенного в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в п. Торы, исследовано проявление в нижней ионосфере ударных акустических волн (УАВ) от 28 сейсмических событий 2011–2016 гг. Обнаружено два вида возмущений, связанных с распространением УАВ, которая вызвана прохождением поверхностной (рэлеевской) сейсмической волны от землетрясения (рис. 132): эффект multicusp (9 событий), расслоение спорадического слоя E_s — E_{sp}-bifurcation (3 события).

Явление multicusp (рис. 132, *а*) заключается в появлении на ионограмме дополнительных перегибов (каспов), которые свидетельствуют о наличии в нижней части ионосферы вертикальных среднемасштабных неоднородностей. Образование таких неоднородностей инициирует УАВ, вызванную поверхностной сейсмической волной [7, 8]. В Байкальском регионе возмущения регистрировались через 7–10 мин после прохождения сейсмического импульса. Эта задержка связана с распространением акустического сигнала от поверхности до ионосферы. Продолжительность наблюдения эффектов составляла 2–3 мин. Следует отметить, что короткое время наблюдения, связанное со временем прохождения сейсмической волны, — характерная особенность эффекта multicusp. Поэтому для его диагностики нужны инструменты с временным разрешением не хуже 1 мин. Такое разрешение обеспечивают высокоскоростные ионозонды. По стандартной международной методике ионограммы были пересчитаны в профили плазменной частоты. Было показано, что основные возмущения, связанные с эффектом multicusp наблюдаются в области высот 140–250 км. При этом амплитуда возмущений на профиле мала, а возмущенный профиль мало отличается от невозмущенного. Таким образом, данные возмущения практически не проявятся в ПЭС. Это объясняет, почему указанные эффекты не регистрируются с помощью GPS.

Суть эффекта E_{sp}-bifurcation (рис. 132, *б*) заключается в том, через 10–15 мин после прохождения поверхностного сейсмического импульса появляется второй слой E_s, который расположен выше регулярного и двигается вниз до сливания с регулярным. Длительность эффекта составляет около 20 мин. Расслоение может быть объяснено формированием горизонтальных неоднородностей и их движением под влиянием нейтрального ветра.

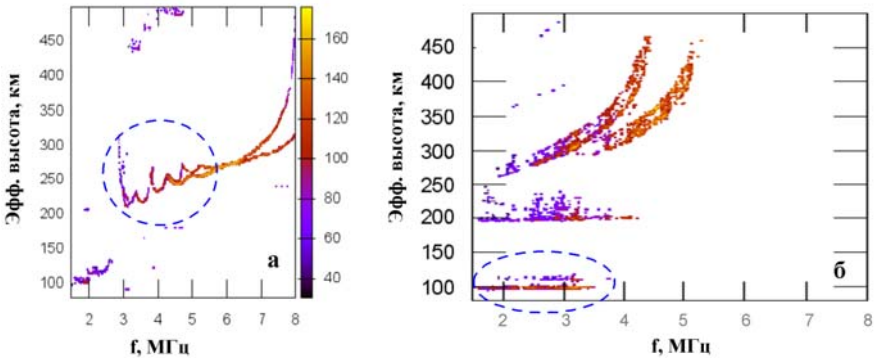


Рис. 132. Эффект multicusp (*а*), зарегистрированный после землетрясения на Суматре 10.04.2013 (*Mw*=8.0) и эффект расслоения слоя E_s (*б*), наблюдавшийся после землетрясения в Японии 25.10.2013 г. (*Mw*=7.1), на ЛЧМ-ионограммах

Анализ полученных данных показал, что нет прямой зависимости между максимальной амплитудой K_A сейсмической волны Рэлея и появляемостью эффектов multicusp и E_{sp}-bifurcation в ионосфере: существуют землетрясения с высокой амплитудой сейсмической волны (K_A=15), от которых не наблюдалось эффектов в ионосфере; с другой стороны, сейсмические волны с небольшой амплитудой (K_A=8) приводят к ионосферным возмущениям. В связи с этим предложено в качестве индекса акустической эффективности сейсмической волны использовать максимальную амплитуду УАВ (индекс K_W). Максимальная амплитуда УАВ определяется не только амплитудой, но и пространственной структурой сейсмической волны (волны Рэлея) поскольку волна Рэлея не является точечным источником (рис. 133). Поэтому при оценке максимальной амплитуды УАВ надо учитывать

диаграмму направленности акустического излучения, которая определяется пространственной структурой распространяющейся сейсмической волны [9]. В предположении существенной удаленности точки наблюдения от эпицентра землетрясения, с учетом почти перпендикулярного распространения конуса Маха УАВ к поверхности Земли получена оценка максимальной логарифмической амплитуды K_W акустической волны в конусе Маха, которая определяется максимумом диаграммы направленности акустического излучения:

$$K_W = \lg\left\{\max\left\{\left|\frac{\omega}{2\pi}\int_T \tilde{h}(t)e^{-i\omega t}dt\right|^2\right\}\right\} - 10, \qquad (22)$$

где $\tilde{h}$ — амплитуда вертикальных сейсмических колебаний (нм), а выражение во внутренних фигурных скобках представляет собой спектр производной вертикальных сейсмических колебаний по времени под точкой ионосферных наблюдений. Таким образом, индекс K_W связан с максимальным значением диаграммы направленности акустического излучения от распределенного источника (рис. 133).

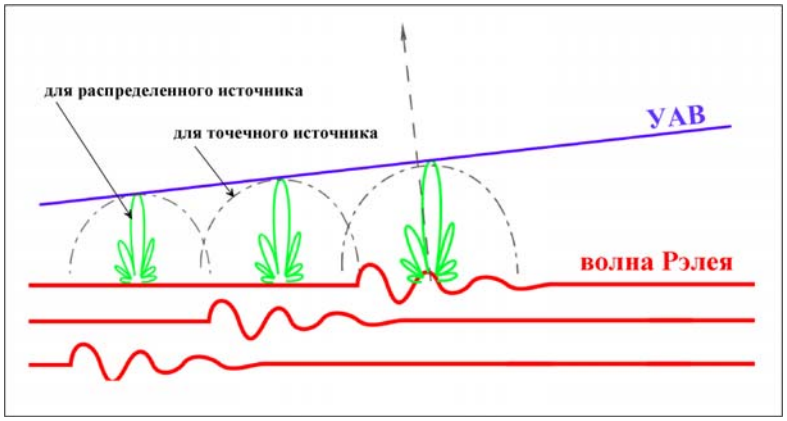


Рис. 133. Схема формирования ударной акустической волны (УАВ) с учетом диаграммы направленности акустического излучения при распространении сейсмической волны Рэлея

Индексы K_W (3.6.3.1) были рассчитаны для всех рассмотренных землетрясений. Установлено, что эффекты multicusp и E_s-bifurcation чаще всего наблюдаются при $K_W > 4.7$.

Публикации:

Berngardt O.I., Perevalova N.P., Podlesnyi A.V., Kurkin V.I., Zherebtsov G.A. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016 // J. Geophys. Res. 2016. (получены положительные рецензии).

3.6.4. Проявление сейсмических событий в собственном излучении верхней атмосферы Земли

Выполнены исследования поведения атмосферной эмиссии атомарного кислорода OI 557.7 нм (высоты высвечивания 85–115 км) во время землетрясений с магнитудой $M \geq 5$, зарегистрированных в Байкальской рифтовой зоне в 2014–2016 гг.

Проведенный анализ вариаций атмосферной эмиссии OI 557.7 нм в периоды зарегистрированных землетрясений (16 событий) позволил выявить более высокие значения средних ночных интенсивностей этой эмиссии в дни, предшествующие землетрясению, по сравнению с последующими днями. Амплитуда изменений средних ночных значений эмиссии 557.7 нм от максимальных перед землетрясением до минимальных в последующие дни составляет в среднем 40–60 %, а для отдельных событий может достигать 100–200 %.

Механизмы вариации эмиссии 557.7 нм в периоды землетрясений могут быть связаны как непосредственно с источниками, сопутствующими подготовке и развитию землетрясе-

ния (ОНЧ-излучение очага землетрясения, вызывающее высыпание электронов на ионосферные высоты; возбуждение и проникновение в атмосферу инфразвуковых колебаний; генерация внутренних акустико-гравитационных волн в сейсмически активных областях; генерация электромагнитного излучения), так и с независимым влиянием динамики нижней атмосферы на сейсмическую активность и верхнюю атмосферу [10–12]. Во втором случае может отмечаться корреляция этих двух процессов, но она не будет обусловлена причинно-следственными связями между ними. Если допустить, что атмосферная циркуляция оказывает воздействие на сейсмичность региона [11, 12], то реакция литосферы, скорее всего, должна иметь вероятностный характер и зависеть от «подготовленности» литосферы, особенностей геологического строения региона, пространственно-временных распределений атмосферных аномалий. Возможны ситуации, когда достаточно мощные тропосферные возмущения не приводят в конечном итоге к землетрясениям, но вызывают сейсмоподобные возмущения в верхней атмосфере. Последнее обстоятельство может приводить к сложности и неоднозначности определения атмосферных предвестников землетрясений, когда наблюдаются специфические возмущения в тропосфере, стратосфере, верхней атмосфере, но в некоторых случаях они сопровождаются землетрясениями, а в других нет.

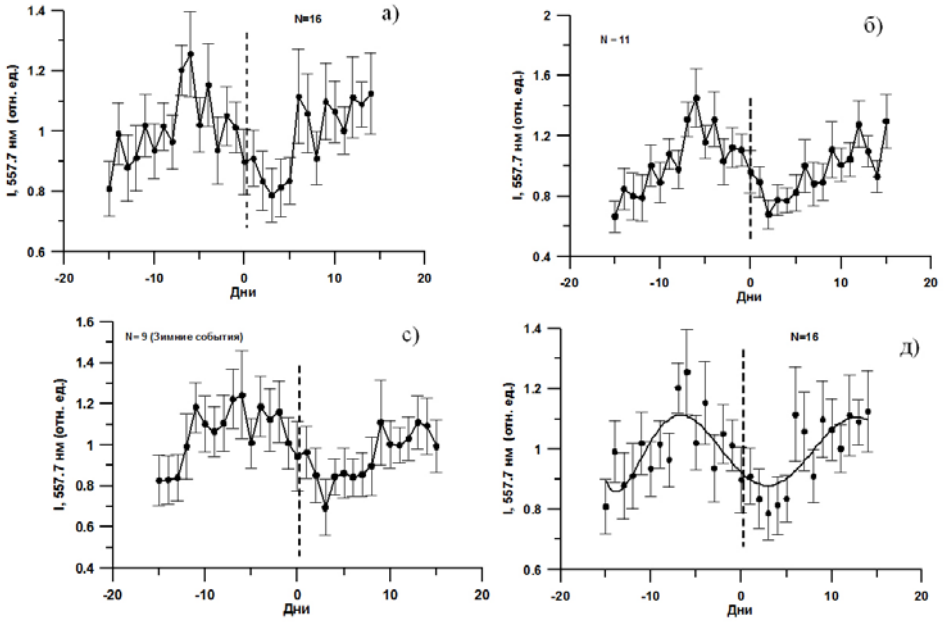


Рис. 134. Вариации относительных интенсивностей эмиссии 557.7 нм в период землетрясений, полученные с использованием статистического метода наложения эпох: *а* — все анализируемые события (число событий *N*=16); *б* — события с выраженной наблюдаемой тенденцией вариации интенсивности 557.7 нм (*N*=11), с) – для событий в зимний период (*N*=9), *д* — аппроксимация полиномом 6-й степени. День землетрясения указан вертикальной штриховой линией

Публикации:

Михалев А.В. Излучение верхней атмосферы Земли в эмиссии OI 557.7 нм в периоды сейсмических событий в Байкальской рифтовой зоне // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1068–1072. DOI: 10.15372/AOO20161200. http://elibrary.ru/item.asp?id =27389643.

Список использованных источников:

1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

2. Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following a Space Shuttle ascent // Geophys. Res. Let. 1996. V. 23. P. 1897–1900.

3. Комаров И.А., Милованов А.Г., Чмаров К.В. Космодром Восточный — будущее российской космонавтики // Космическая техника и технологии. 2015. № 3(10). С. 3–14.

4. Li Y.Q., Jacobson A.R., Carlos R.C., Massey R.S., Taranenko Y.N., Wu G. The blast wave of the Shuttle plume at ionospheric heights // Geophys. Res. Let. 1994. V. 21. P. 2737–2740.

5. Нагорский П.М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т. 38. С. 100–106.

6. Ding F., Wan W., Mao T., Wang M., Ning B., Zhao B., Xiong B. Ionospheric response to the shock and acoustic waves excited by the launch of the Shenzhou 10 spacecraft // Geophys. Res. Let. 2014. V. 41. P. 3351–3358.

7. Maruyama T., Shinagawa H. Infrasonic sounds excited by seismic waves of the 2011 Tohoku-Oki earthquake as visualized in ionograms // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119, N 5. P. 4094–4108.

8. Maruyama T., Yusupov K., Akchurin A. Ionosonde tracking of infrasound wavefronts in the thermosphere launched by seismic waves after the 2010 M8.8 Chile earthquake // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121, N 3. P. 2683–2692.

9. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Ленинград: Судостроение, 1973. 279 с.

10. Кочеткова О.С., Михалев А.В., Мордвинов В.И., Татарников А.В. Динамика атмосферы и сейсмическая активность в байкальской рифтовой зоне // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 3. С. 55–61.

11. Сытинский А.Д. О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37, № 2. С. 132–137.

12. Боков В.Н. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 89–100.

3.7. Изучение динамических процессов в системе нейтральная атмосфера – ионосфера – магнитосфера Земли

3.7.1. Исследование процессов динамического воздействия тропосферы, стратосферы и мезосферы на ионосферу Земли в условиях гелиогеофизических возмущений различной природы

3.7.1.1. Проявление метеорологических эффектов в вариациях параметров средней атмосферы и ионосферы

Выполнен анализ пространственных и временных вариаций вертикальных скоростей движения атмосферного газа на высотах стратосферы и нижней мезосферы в Северном полушарии для 2008–2013 гг. по данным архива реанализа ECMWF ERA-Interim. Для всех анализируемых лет выявлены среднемасштабные волновые движения в осенне-зимние периоды (с ноября по февраль), которые связаны со стратосферными струйными течениями и могут быть источниками атмосферных гравитационных волн. Для разных высот и широтных диапазонов исследованы спектры пространственных вариаций вертикальной скорости. Высотные вариации спектра показывают, что выше некоторой критической высоты стратосферы вблизи стратопаузы данные волны распространяются как внутренние гравитационные волны (ВГВ). Ниже этой высоты волны затухают вследствие каскадного дробления атмосферных вихрей и турбулентного перемешивания. Области генерации волновых движений совпадают с зоной взаимодействия струйных течений, расположенных на разных высотах стратосферы.

Показано, что эти волновые возмущения передаются на высоты нижней мезосферы и выше и проявляются в виде перемещающихся атмосферных и ионосферных возмущений. По данным ионозондов DPS-4 в Иркутске и Норильске в 2008–2010 гг. установлено, что в периоды усиления стратосферной волновой активности наблюдалось заметное повышение высокочастотной части изменчивости в максимуме электронной концентрации F2-слоя (в диапазоне периодов от 0.5 до 6 ч), которая в основном вызвана перемещающимися ионосферными возмущениями, связанными с распространением гравитационных волн.

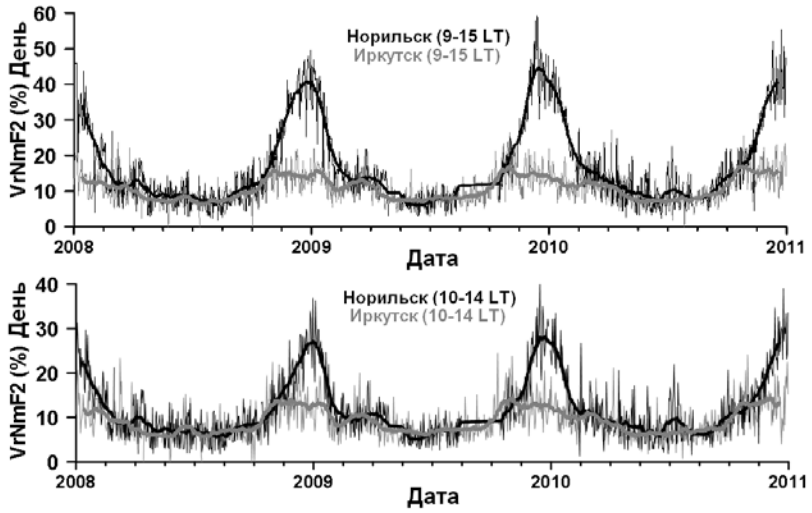


Рис. 135. Временные изменения коэффициента вариаций VrN_mF2 над Иркутском и Норильском в 2008–2010 гг. для периодов 4 и 6 ч, сглаженные скользящим средним по 27 дням

Оценена зависимость этих эффектов от положения пункта наблюдения относительно зоны циркуляции струйного течения. Для обеих станций наибольшая изменчивость в ионосфере на высотах F2-слоя наблюдалась в зимнее время, а наименьшая — в летнее. Разница зима–лето более контрастна для Норильска (рисунок 3.7.1).

Возможные причины различия волновой активности на высотах F2-слоя ионосферы над Норильском и Иркутском в зимние сезоны могли быть связаны с тем, что эти регионы были подвержены воздействию различных частей зимних стратосферных циркумполярных вихрей, которые меняли свою структуру каждую зиму. Над зонами вихрей генерировались среднемасштабные волновые движения, которые распространялись вверх до высот термосферы и ионосферы, изменяя баланс отношения [O]/[N2] и вызывая, как следствие, вариации ионосферных параметров.

Использовались данные распределенной цепочки ионозондов, расположенных в диапазоне широт ~50–60° N в долготном секторе 0–158° E через 15–20° по долготе и охватывающих весь Евразийский континент. Выявлены региональные особенности реакции ионосферы на высотах F2-слоя, связанные с развитием и трансформацией в течение зимы циркумполярного вихря на высотах стратомезосферы в 2008–2013 гг. Нерегулярные вариации параметров ионосферы также могли быть вызваны волновыми возмущениями различных пространственно-временных масштабов, включая ВГВ, распространяющимися в термосферу из нижележащей атмосферы. Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся на разных долготах Северного полушария, существенно зависели от положения ионозондов относительно преобладающего зимнего струйного течения в стратомезосфере. Разница в значениях критических частот для ионозондов, разнесенных по долготе всего на 15–20° , могла достигать 1.5–2 МГц в зависимости от расположения пункта наблюдения под струйным течением или вне его, т. е. проявлялся так называемый долготный эффект (рис. 136).

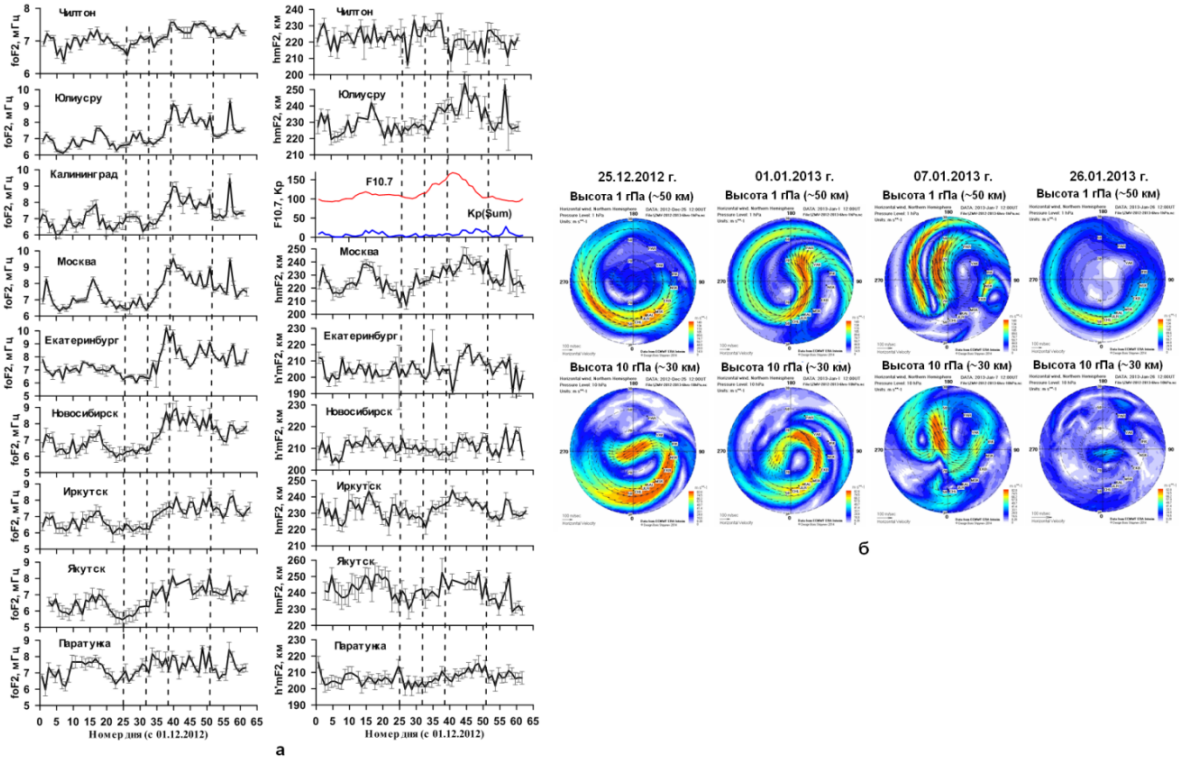


Рис. 136. Среднедневные значения f_0F2 и h_mF2 по данным широтной цепочки ионозондов для декабря 2012 – января 2013 г. (*а*); поля горизонтальных скоростей газа в стратосфере на уровне 10 гПа (~30 км) и в нижней мезосфере на уровне 1 гПа (~50 км) для отдельных дней зимы 2012–2013 гг. (*б*)

Публикации:

1. Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Хабитуев Д.С. Спектральные характеристики атмосферных волн, генерируемых зимним стратосферным струйным течением Северного полушария // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 120–131. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131.

2. Khabituev D.S., Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K. G. The ionospheric response on gravity waves generated by stratospheric jet stream // V International Conference “Atmosphere, ionosphere, safety”: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 130–135. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf

3. Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Мелич Й. Пространственные вариации параметров ионосферы Северного полушария над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 204–215. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-204-215.

3.7.2. Мониторинг и диагностика ионосферы и нейтральной атмосферы Азиатского региона России с использованием наземных и спутниковых методов зондирования. Проведение регулярных измерений, организация банков данных GPS/ГЛОНАСС, спутниковых, оптических измерений в Азиатском регионе России

3.7.2.1. Оптические измерения собственного излучения верхней атмосферы Земли

В 2016 г. проводились регулярные (в темное время суток) оптические наблюдения спектрального и пространственного распределения интенсивности атмосферных эмиссий

на высокоширотной станции «Исток» ИСЗФ СО РАН (70°1'56" N, 88° 1'24" E). В настоящее время на станции «Исток» установлено следующее оптическое оборудование.

• Спектрометр «Shamrock 303i». Прибор ориентирован на север с зенитным углом ~20º. Поле зрения ~25º вдоль входной щели и ~0.5º поперек. Полный рабочий спектральный диапазон 380–880 нм. Одновременно регистрируется спектральный диапазон шириной ~60 нм с экспозицией 10 с. Полный спектральный диапазон регистрируется за 10 этапов.

• Широкоугольные обзорные камеры CSDU-285-C и SDU-415C, предназначенные для регистрации пространственной картины вариаций излучения ночной атмосферы в спектральном RGB-диапазоне. Поле зрения камер ~70º и ~135° соответственно. Экспозиции 15 с и 30 с.

• Широкоугольные камеры «Видеоскан-11002», CSDU-423-1 и CSDU-423-2 предназначены для исследования пространственного распределения вариаций излучения атмосферы в эмиссиях атомарного кислорода 630 нм и 557.7 нм, полосе $1NGN_{2+}$ (0–1) 427.8 нм. Поле зрения камер ~140º, ~70º и ~70º соответственно, экспозиция 30 с. Примеры кадров, полученных с помощью камеры CSDU-285-C, и соответствующие им спектры, измеренные с помощью спектрометра «Shamrock 303i», приведены на рис. 137.

В апреле 2016 г. проведены профилактические работы на оптическом оборудовании станции «Исток». Спектрометр запущен в круглосуточном режиме (опытная эксплуатация). Создано программное обеспечение для предварительной обработки данных ПЗС-камер. В октябре 2016 г. заменены интерференционные фильтры на широкоугольных камерах «Видеоскан-11002», CSDU-423-1 и CSDU-423-2. Для калибровки спектрометра «Shamrock 303i» по длинам волн и проверки чувствительности в разных спектральных диапазонах был рассчитан накопленный спектр за 110 ч наблюдений. Проведена работа по идентификации основных наблюдаемых эмиссий (рис. 138).

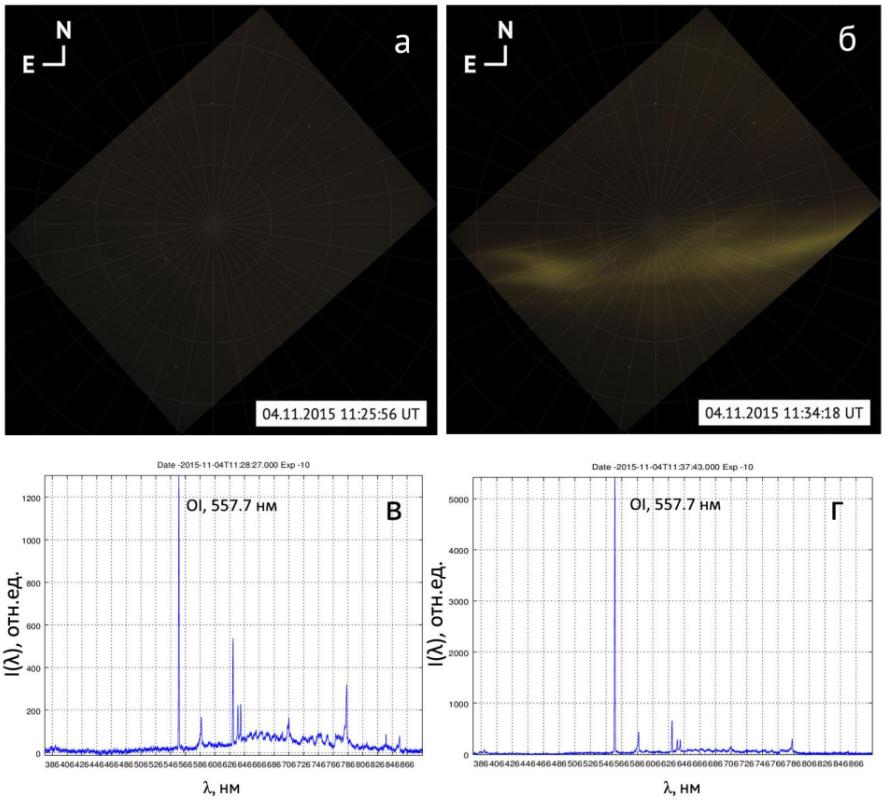


Рис. 137. Кадры, полученные с помощью камеры CSDU-285-C 4 ноября 2015 г. в 11:25:56 (*а*) и 11:34:18 UT (*б*) и соответствующие им спектры (*в*, *г*), измеренные с помощью спектрометра «Shamrock 303i». На кадры камеры наложена координатная сетка с шагом 10° по углу места и азимуту. Центр координат в зените

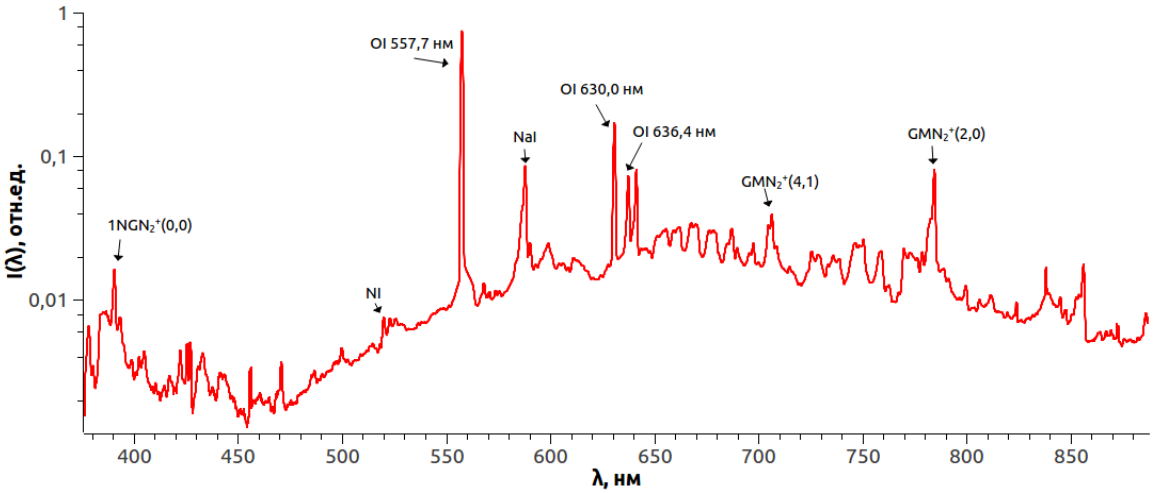


Рис. 138. Накопленный спектр (~110 ч) в диапазоне 377–880 нм, полученный на станции «Исток» в период с 31.10.2015 по 12.11 2015 г.

В 2016 г. продолжались также регулярные оптические наблюдения собственного свечения верхней атмосферы Земли в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E, Республика Бурятия, с. Торы).

С целью исследования явлений и процессов в верхней атмосфере Земли были рассмотрены результаты цветовой фотометрии ночной атмосферы с учетом собственного излучения верхней атмосферы и особенностей его спектрального состава. Использовались данные ГФО наблюдений свечения ночной атмосферы за 2010–2015 гг. камерой с охлаждаемой цветной ПЗС-матрицей «KODAK KAI-11002». Получены оценки средней светимости ночного неба в спектральных диапазонах R-, G-, B-каналов цветной камеры для региона Восточной Сибири с характерными значениями ~0.008–0.01 эрг·см$^{-2}$·с$^{-1}$. Определен сезонный ход светимостей ночного неба в R-, G-, B-каналах цветной камеры, характеризующийся понижением в весенние месяцы, возрастанием в осенние месяцы и наличием летнего максимума, который объясняется рассеянным солнечным светом и связан с месторасположением ГФО. Рассмотрены геофизические явления, имеющие оптические проявления в R-, G-, B-каналах цветной камеры. Показана возможность для некоторых геофизических явлений (геомагнитных бурь, внезапных зимних стратосферных потеплений) количественно связывать усиление сигналов в G- и R-каналах с ростом интенсивностей дискретных эмиссий 557.7 и 630.0 нм, которые доминируют в спектре собственного излучения верхней атмосферы (рис. 139).

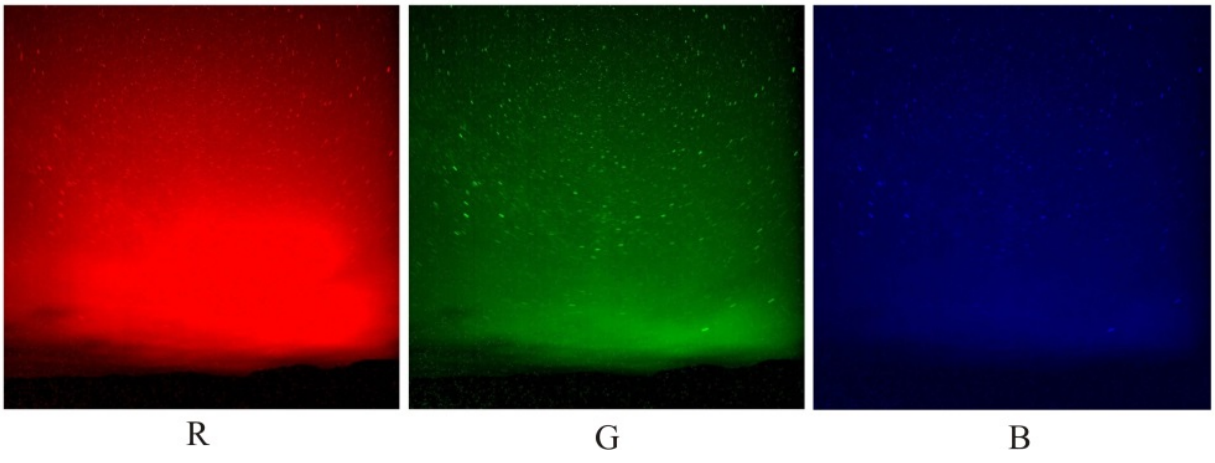


Рис. 139. Изображения полярного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г., полученные при ракурсных наблюдениях в R-, G-, B-каналах цветной камеры в ГФО ИСЗФ СО РАН

Экспериментальные данные оптических измерений, полученные в ГФО, передавались в ИСЗФ СО РАН в режиме онлайн. Регулярно пополнялись банки данных оптических измерений. Поддерживаются базы оптических данных с возможностью просмотра на сайте atmos.iszf.irk.ru (доступ по паролю).

Публикации:

1. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В. Спектральные измерения собственного излучения ночной атмосферы с помощью спектрографа «Shamrock SR-303I» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 192–197.

2. Михалев А.В., Подлесный С.В., Стоева П.В. Свечение ночной атмосферы в RGB цветовом представлении // Солнечно-земная физика. 2016. Том 2. № 3. С. 74–80. DOI: 10.12737/19040.

3.7.2.2. Спутниковая информации о параметрах атмосферы

В 2016 г. регулярно пополнялся архив спутниковой информации о параметрах атмосферы по данным станции приема спутниковых снимков «Алиса-СК», установленной в ИСЗФ СО РАН, а также по данным Интернет. Аппаратно-программный комплекс «Алиса-СК» обеспечивает прием и обработку информации с ИСЗ NOAA. В настоящее время на сайте ИСЗФ СО РАН доступен архив телеметрии NOAA и карты распределения облачного покрова. Архив телеметрии NOAA пополняется непосредственно после окончания приема данных со спутника и расположен по адресу http://atmos.iszf.irk.ru/ru/sputnik/noaa. Кроме технических данных о пролете, существует возможность просмотра обзорного изображения пролета. В течение месяца на сайте доступен также и сам файл телеметрии. Карты распределения облачного покрова создаются непосредственно после приема данных со спутника в автоматическом режиме и доступны на http://atmos.iszf.irk.ru/ru/sputnik/clouds. На http://atmos.iszf.irk.ru/ru/sputnik/mls представлено пространственное распределение температуры на высотах от 56 до 0.001 гПа по данным микроволнового радиометра MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на борту спутника «Aura» и предназначенного для измерения температуры и концентрации газовых примесей в различных слоях атмосферы. Исходные данные радиометра MLS получены черезИнтернет.

3.7.2.3. Измерения на сети приемников GPS/ГЛОНАСС

В 2016 г. поддерживались измерения в постоянном режиме на сети наземных приемников GPS/ГЛОНАСС, развернутой ИСЗФ СО РАН в Байкальском регионе. В дополнение к измерительным пунктам TORY, USOL, LIST, ISTP, MOND, UZUR, SARM введен в действие пункт постоянных GPS/ГЛОНАСС измерений NORI на высокоширотной станции «Исток» ИСЗФ СО РАН. С помощью приемников GPS/ГЛОНАСС в пунктах измерений проводятся групповые и фазовые измерения с частотой 1 Гц (стандартный режим). Кроме того, в пункте ISTP в постоянном режиме ведутся амплитудные измерения. В 2016 г. действовал пункт временного (июнь–октябрь) размещения для проведения амплитудных измерений TORY. В пункте NORI, MOND установлены каналы связи для передачи данных и контроля приемника. Данные пунктов TORY, LIST, UZUR, ISTP, NORI, MOND передаются в ИСЗФ СО РАН ежедневно в автоматическом режиме (при наличии канала связи). При потере канала связи данные «докачиваются» по мере его восстановления. Данные с остальных пунктов передаются курьером по запросу. Данные измерений сети GPS/ГЛОНАСС-приемников ИСЗФ СО РАН хранятся в специализированном банке данных в трех форматах: исходный бинарный формат приемника (разрешение 1 с), стандартный формат RINEX (разрешение 1 с), стандартный формат RINEX (разрешение 30 с).

Кроме данных, полученных на приемных пунктах ИСЗФ СО РАН, банк регулярно пополняется данными мировых сетей станций GPS (IGS, GSI/GEONET, UNAVCO и др.), файлами с навигационными сообщениями ГЛОНАСС и GPS, мировыми картами полного электронного содержания IONEX ведущих научных групп (CODG, JPLG, UPCG, IGSG, EMRG, ESAG).

3.7.2.4. Оптическое проявление работы бортовых двигателей низкоорбитальных космических аппаратов

Проведены исследования результатов оптических наблюдений собственного излучения верхней атмосферы Земли в космическом эксперименте (КЭ) «Радар–Прогресс», выполняемом при участии ИСЗФ СО РАН в 2007–2014 гг. К настоящему времени выполнен анализ оптических эффектов в двух экспериментах: 17 апреля 2013 г. и 30 июля 2014 г. после включения на высотах термосферы сближающе-корректирующего двигателя (СКД) транспортных грузовых кораблей (ТГК) «Прогресс М-17М» и «Прогресс М-23М». В обоих экспериментах во время работы СКД зарегистрированы области свечения повышенной интенсивности (рис. 140), предположительно связанные с рассеянием сумеречного солнечного излучения на продуктах работы СКД на орбите ТГК и, возможно, с появлением дополнительного свечения в эмиссии атомарного кислорода OI 630 нм. Максимальные наблюдаемые размеры области свечения составили ~330–350 км вдоль орбиты и ~250–270 км поперек. Скорость расширения области свечения в первые моменты времени после включения СКД вдоль орбиты составила ~6–7 км/с, поперек ~3–3.5 км/с. Максимальная интенсивность области возмущения в сеансе КЭ с «Прогресс М-17М» оценивается величиной, эквивалентной ~ 40–60 Рл в спектральной полосе 2 нм. В сеансе с «Прогресс М-23М» зарегистрированы незначительные возмущения атмосферной эмиссии OI 630.0 нм как в ближней, так и в дальней зонах от орбиты ТГК, возможно, связанные с инжекцией выхлопных газов СКД.

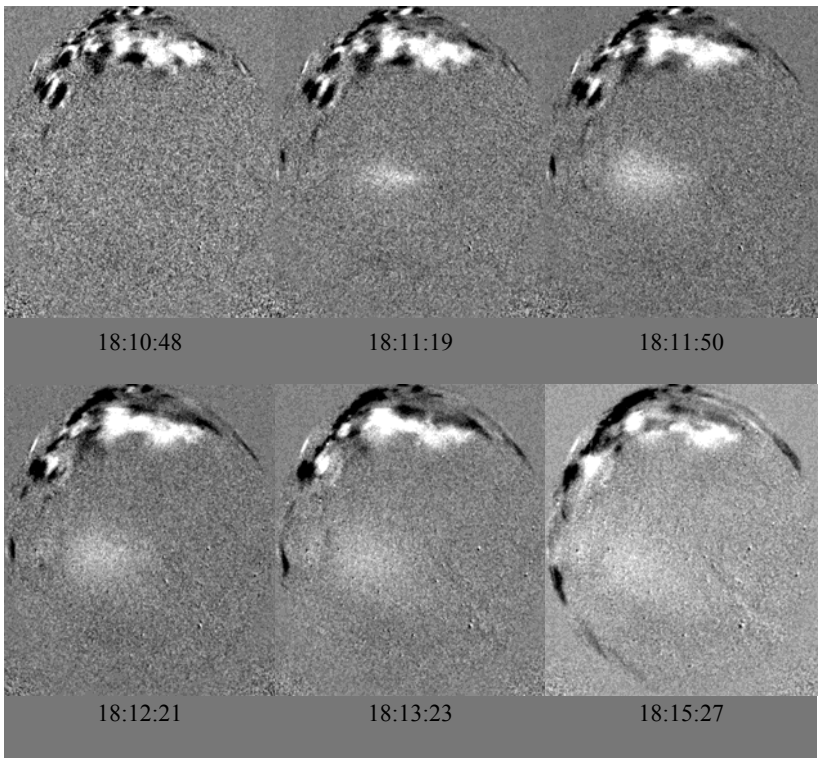


Рис. 140. Последовательность кадров изображений, полученных оптической системой «KEO Sentinel» в эмиссии 630 нм 30.07.2014 г. в сеансе с «Прогресс М-23М». Время работы СКД 18:11:10–18:11:18 UT

Публикации:

1. Михалев А.В., Хахинов В.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П. Оптические эффекты работы бортового двигателя космического аппарата «Прогресс М-17М» на высотах термосферы // Косм. иссл. 2016. Т. 54, № 2. С. 113–118. DOI: 10.7868/S0023420616020035.

2. Белецкий А.Б., Михалев А.В., Хахинов В.В., Лебедев В.П. Оптическое проявление работы бортовых двигателей низкоорбитальных космических аппаратов // Солнечно-земная физика. 2016. Том 2, № 4. С. 85–91.

3.7.3. Исследование физических процессов динамики ионосферы в периоды геомагнитных возмущений на основе данных наблюдений и теоретического моделирования

3.7.3.1. Реакция ионосферы и термосферы на магнитную бурю 17 марта 2015 г.

По данным вертикального и наклонного радиозондирования исследованы возмущения в ионосфере и термосфере во время магнитной бури 17–19.03.2015 г. в северо-восточном регионе России (рис. 141). Во время главной и ранней восстановительной фаз на среднеширотных станциях зафиксированы крайне низкие значения электронной концентрации в максимуме слоя F2. На трассах, расположенных в северо-восточной части России 17 марта были зарегистрированы сигналы, распространяющиеся вне дуги большого круга.

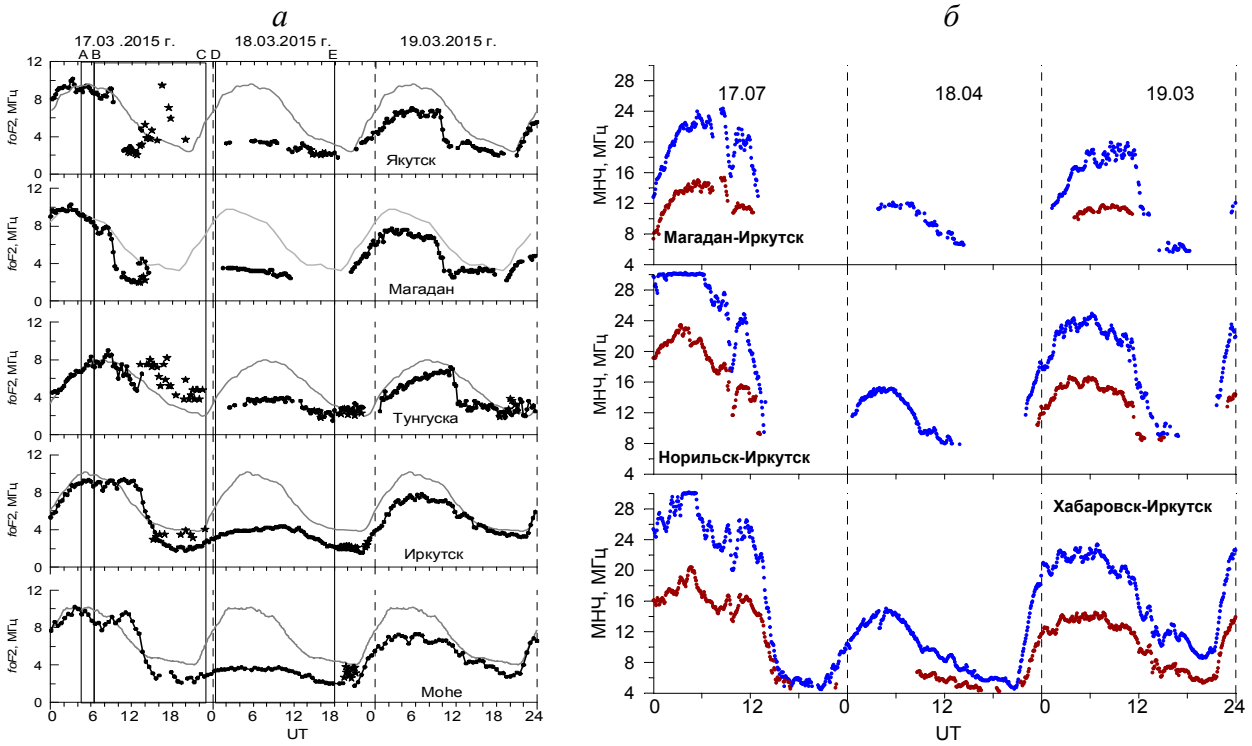


Рис. 141. Вариации критических частот (*а*) и максимальных наблюдаемых частот (*б*) во время геомагнитной бури 17–19 марта 2015 г. Тонкая линия — фоновые значения, соответствующие спокойным геомагнитным условиям, символы — текущие значения, синие линии — МНЧ односкачковой моды, коричневые — двухскачковой моды

В вечерние и ночные часы прохождение радиосигналов на трассах Норильск–Иркутск и Магадан–Иркутск отсутствовало. Показано, что наблюдаемые эффекты в ионосфере обусловлены резким смещением границ главного ионосферного провала до инвариантной широты 46° N во время главной фазы магнитной бури. Это привело к тому, что явления, характерные для субавроральных широт, наблюдались на средних широтах. Отрицательное ионосферное возмущение во время восстановительной фазы бури, связанное

со значительными вариациями состава нейтральной атмосферы, привело к изменению модового состава принимаемых радиосигналов и спаду максимальных наблюдаемых частот в дневные часы 18 марта 2015 г. более чем в два раза.

Для интерпретации данных зондирования были выполнены модельные расчеты распределения электронной концентрации в ионосфере высоких, средних и низких широт интенсивной геомагнитной бури 17–19 марта 2015 г. вдоль меридиана 120° E. Результаты моделирования показали, что продолжительные отрицательные возмущения на фазе восстановления на средних широтах связаны с изменением глобальной ветровой циркуляции и изменением нейтрального состава атмосферы (уменьшением отношения [O]/[N2]). На низких широтах отрицательное возмущение обусловлено изменением глобальной ветровой циркуляции и проникновением электрических полей на низкие широты, вследствие чего 18 марта экваториальная аномалия не сформировалась. Изменение нейтрального состава незначительно повлияло на распределение электронной концентрации.

Публикации:

Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Подлесный А.В. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5. С. 591–605.

3.7.4. Разработка теоретических и эмпирических глобальных и региональных моделей нейтральной атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли

3.7.4.1. Генерация ночных среднеширотных свечений в красной и зеленой линиях атомарного кислорода при наличии электронных высыпаний

Ранее в рамках данного проекта было показано, что во время геомагнитных возмущений возникает специфический отклик эмиссий атомарного кислорода в зеленой 557.7 нм и красной 630 нм линиях на резкие вариации параметров солнечного ветра [9] и сделано предположение, что этот отклик мог быть вызван потоками энергичных электронов захваченных на низких L-оболочках во время предыдущего возмущения. На данном этапе проведено исследование структуры ионосферы и кислородных эмиссий, которые могут генерироваться в результате высыпания таких электронов.

Для интерпретации наблюдаемых интенсивностей свечения атомарного кислорода в линиях 557.7 и 630 нм было выполнено теоретическое моделирование высотных профилей указанных эмиссий (объемные светимости) и их интегральных значений, которые могут возникать в ночной среднеширотной ионосфере под действием вторгающихся потоков электронов с различными средними энергиями (E_{av}= 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 кэВ) и интегральными потоками энергии (P_e =0.1–3.5 эрг·см$^{-2}$·с$^{-1}$). Основной результат моделирования заключается в том, что высыпания вызывают свечения в красной и зеленой линиях атомарного кислорода не в результате прямого возбуждения метастабильных уровней ^{1}D и ^{1}S электронным ударом, а опосредствованно путем увеличения скоростей ионообразования и нагрева тепловых электронов, что, в свою очередь, приводит к увеличению скорости диссоциативной рекомбинации и возбуждения уровня ^{1}D при столкновениях с тепловыми электронами.

Публикации:

Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода для умеренно-возмущенных геомагнитных условий на средних широтах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 4. С. 76–84. DOI: 10.12737/21491.

3.7.4.2. Насыщение магнитосферы и полярной шапки во время супербурь

На основе данных наблюдений более 110 наземных геомагнитных обсерваторий методом техники инверсии магнитограмм, разработанным в ИСЗФ СО РАН, получены новые закономерности процесса насыщения магнитосферы, т.е. замедления и остановки роста потока электромагнитной энергии через ее границу и полярную шапку из солнечного ветра (СВ) при его необычном усилении во время супербурь [11]. Показано, что насыщение вызывается не только известным в литературе ростом южной компоненты межпланетного магнитного поля, но и ростом динамического давления СВ (рис. 142, *а*). Явление насыщения относительно роста обоих этих факторов, которые в период супербури после прохождения ее переднего фронта благодаря практически неизменной скорости СВ являются независимыми, объясняется существованием предела сжимаемости магнитосферы при усилении потоков СВ. Показано, что уменьшение размеров магнитопаузы довольно быстро прекращается за счет увеличения напряженности геомагнитного поля при его сжатии (рис. 142, *б*), что вызывает остановку роста полярной шапки и потока энергии через нее. Этот вывод подтвержден результатами глобального МГД-моделирования обтекания магнитосферы (рис. 142, *а*, *б*).

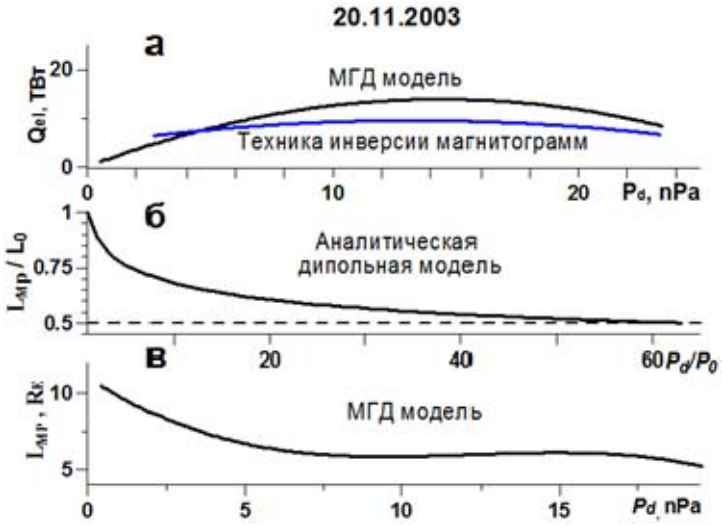


Рис. 142. Насыщение при росте динамического давления СВ P_d потока электромагнитной энергии Q_{el} из СВ в магнитосферу во время супербури 20.11.2003 г. по данным численной МГД-модели (черная кривая) и в ионосферу полярной шапки по данным техники инверсии магнитограмм (синяя кривая) (*а*); расстояния L_{mp} до дневной границы магнитосферы : аналитическая кривая (безразмерные величины) (*б*) и данные МГД-моделирования (*г*)

Публикации:

Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Yr., Han J.P., Wang C. Saturation of superstorms and finite compressibility of the magnetosphere: Results of the Magnetogram Inversion Technique and Global PPMLR-MHD Model // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 6734–6741. DOI: 0.1002/2016GL069649.

3.7.4.3. Асимметрия продольных токов в ионосферах двух полушарий

Рассмотрена динамика соотношения интенсивностей между утренней и вечерней частями трех зон продольных токов: низкоширотной (зона 2), высокоширотной (зона 1) и околополюсной полярной шапкой (зона 0) [12]. Показано следующее.

1. Отношение тока зоны 0 (обычно не учитываемого) к току зоны 2 достигает 40 %; учет вклада зоны 0 в сумму токов зон 2 и 0 позволяет удовлетворить закону непрерывности

тока (закону Кирхгофа) между зоной 1 и окружающими ее зонами 0 и 2 с относительной ошибкой около 10 %.

2. Для четырех случайно выбранных событий получена асимметрия утро–вечер распределения продольных токов во всех трех зонах, которая не связана с известной причиной — азимутальной компонентой межпланетного магнитного поля.

3. На основе модели глобальной электрической цепи магнитосферы, включающей ионосферы двух полушарий, показано, что такая асимметрия может быть обусловлена асимметрией север–юг распределения проводимости в ионосфере (сезонный ход) или распределения плазмы в магнитосфере. При этом в замыкании продольных токов, соединяющих магнитосферный генератор с ионосферой, в последней главную роль играют меридиональные, а не азимутальные токи, как в известной модели токового клина суббури. Этот вывод подтвержден при анализе соотношения токов в мезомасштабных ячейках в каждой зоне до и после полуночи.

Публикации:

Мишин В.М., Мишин В.В., Моисеев А.В. Распределение продольных токов в ионосфере: асимметрия утро–вечер и ее связь с асимметрией в двух полушариях // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5, С. 558–567. DOI: 10.7868/S0016794016050096.

3.7.4.4. Свойства дневных длиннопериодных пульсаций во время начала магнитной бури

Исследован процесс образования и распространения длинноволновых пульсаций в результате взаимодействия потоков солнечного ветра (СВ) с магнитосферой Земли. Показано, что при набегании ударного вспышечного фронта солнечного ветра, вызвавшего магнитосферную бурю, при его ударе на магнитопаузе возбуждаются длиннопериодные геомагнитные пульсации, которые разбегаются на ночную сторону. Использование большой сети обсерваторий позволило впервые показать [13] следующее:

- разбегание пульсаций происходит от границ долготного сектора шириной около двух часов, центр которого смещен от полудня на час местного магнитного времени вследствие наклона фронта СВ;
- для короткоживущих импульсных пульсаций получены закономерности смены поляризаций пульсаций по широте и долготе;
- спектрально-временной анализ показал практическую независимость основного спектрального пика пульсаций от колебаний в солнечном ветре;
- проникновение колебаний из СВ на широтах полярной шапки может обусловить второй дополнительный спектральный максимум пульсаций на Земле.

Публикации:

Клибанова Ю.Ю., Мишин В.В., Цэгмэд Б., Моисеев А.В. Свойства дневных длиннопериодных пульсаций во время начала магнитосферной бури // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 4. С. 457–471. DOI: 10.7868/S0016794016040076.

Список использованных источников:

1. Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Хабитуев Д.С. Спектральные характеристики атмосферных волн, генерируемых зимним стратосферным струйным течением Северного полушария // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 120–131. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131.

2. Khabituev D.S., Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. The ionospheric response on gravity waves generated by stratospheric jet stream // V International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 130–135. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

3. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2015. V. 136. P. 235–243. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.006.

4. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В. Спектральные измерения собственного излучения ночной атмосферы с помощью спектрографа «Shamrock SR-303I» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 192–197.

5. Михалев А.В., Подлесный С.В., Стоева П.В. Свечение ночной атмосферы в RGB цветовом представлении // Солнечно-земная физика. 2016. Том 2, № 3. С. 74–80. DOI: 10.12737/19040.

6. Михалев А. В., Хахинов В. В., Белецкий А. Б., Лебедев В. П. Оптические эффекты работы бортового двигателя космического аппарата «Прогресс М-17М» на высотах термосферы // Косм. иссл. 2016. Т. 54, № 2. С.113–118. DOI: 10.7868/S0023420616020035.

7. Белецкий А.Б., Михалев А.В., Хахинов В.В., Лебедев В.П. Оптическое проявление работы бортовых двигателей низкоорбитальных космических аппаратов // Солнечно-земная физика. 2016, Т. 2, № 4. С. 85–91.

8. Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Подлесный А.В. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5. С. 591–605.

9. Leonovich L.A., Tashchilin A.V., Leonovich V.A. Response of 557.7 and 630_nm atomic oxygen emissions to sharp variations in solar wind parameters // Atmospheric and Oceanic Optics. 2015. V. 28, N 4. P. 376–380.

10. Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода для умеренно-возмущенных геомагнитных условий на средних широтах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 76–84. DOI: 10.12737/21491.

3.8. Изучение волновых процессов и возмущений в околоземном космическом пространстве

3.8.1. Механизмы генерации азимутально-крупномасштабных волн типа Pc5

По современным представлениям, азимутально-крупномасштабные волны типа Pc5 (периоды порядка нескольких минут) с тороидальной поляризацией генерируются источниками, расположенными за пределами магнитосферы. В их числе импульсы давления солнечного ветра, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца. Кроме того, эти волны могут проникать в магнитосферу непосредственно из солнечного ветра [1]. Эти механизмы генерируют быстрые магнитозвуковые (БМЗ) волны во внешних частях магнитосферы. При распространении вглубь магнитосферы БМЗ-волны могут возбуждать тороидальные альфвеновские колебания на магнитных оболочках, где частота внешнего источника совпадает с локальной частотой собственных колебаний геомагнитной силовой линии. Этот процесс описывается резонансной теорией (field line resonance). В отличие от азимутально-крупномасштабных волн, азимутально-мелкомасштабные УНЧ-волны предполагаются генерированными внутримагнитосферными источниками.

Однако многие наблюдения независимо показывают, что азимутально-крупномасштабные пульсации типа Pc5 возбуждаются преимущественно в области аврорального овала, характеризуемого существованием продольных токов. Ранее разработанные теории не позволяли дать теоретическое объяснение этому факту. Участниками проекта была разработана теория генерации азимутально-крупномасштабных волн Pc5 флуктуациями продольных токов в магнитосфере. Эти источники имеют внутримагнитосферное происхождение, как и источники, обычно предлагаемые для объяснения генерации азимутально-мелкомасштабных волн.

Было показано, что поперечная структура альфвеновских волн, генерированных флуктуациями продольных токов в магнитосфере, имеет те же характерные особенности, что и у

волн, возбуждаемых внешними источниками: локализованный по широте пик амплитуды, а также сдвиг по фазе на 180^{o} поперек резонансной магнитной оболочки. Оценка амплитуды волн от источников такого типа находится в согласии с данными наблюдений азимутально-крупномасштабных волн типа Pc5.

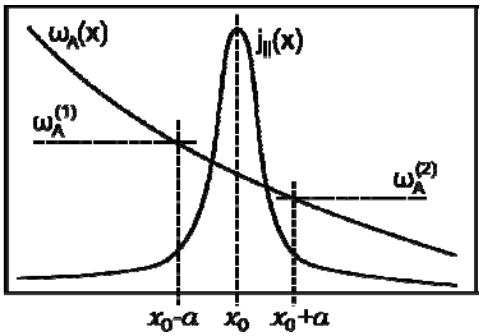


Рис. 143. Диапазон резонансных частот, определяемых положением продольных токов в магнитосфере

Публикации:

Pilipenko V. A., Klimushkin D. Yu., Mager P. N., Engebretson M. J., Kozyreva O.V. Generation of resonant Alfvén waves in the auroral oval // Ann. Geophys. 2016. V. 34. P. 241–248. DOI:10.5194/angeo-34-241-2016.

3.8.2. Статистический анализ событий пульсаций Pc5 по данным Екатербургского когерентного декаметрового радара

Источники азимутально-мелкомасштабных волн типов Pc4-5 являются внутримагнитосферными. Это могут быть неустойчивости высокоэнергичной компоненты космической плазмы или переменные токи, возникающие при инжекции заряженных частиц во время суббурь. Природа волн такого типа до конца неизвестна: хотя многие из них ассоциируются с альфвеновскими волнами, некоторые могут быть идентифицированы с дрейфово-компрессионными волнами — колебаниями кольцевого тока в магнитосфере, сопровождающимися вариациями модуля магнитного поля Земли.

Азимутально-мелкомасштабные волны не проникают на поверхность Земли и не могут изучаться с помощью наземных магнитометров, однако фиксируются спутниками и радарами. Наблюдение магнитосферных УНЧ-волн с помощью радаров базируется на анализе рассеяния на неоднородностях F-слоя ионосферы: по доплеровскому смещению определяются скорости этих неоднородностей, возникающие в результате электрического дрейфа ионосферной плазмы в магнитном поле, и далее вариации этих скоростей ассоциируются с электрическим полем магнитосферных УНЧ-волн (рис. 144).

Участниками проекта проведен статистический анализ пульсаций Pc5, зарегистрированных на ночной стороне магнитосферы с помощью Екатеринбургского когерентного декаметрового радара (радар EKB) в 2014 и 2015 гг. в рамках эксперимента по изучению УНЧ-волн [2]. Проведено сравнение частот наблюдаемых пульсаций с частотами фундаментальной гармоники альфвеновской волны, рассчитанными по данным спутниковых миссий THEMIS и VanAllen. Установлено, что большинство пульсаций имеют частоты значительно ниже фундаментальной альфвеновской частоты и не коррелируют с ней (рис. 145). На основе полученного результата можно сделать вывод, что наибольшая часть Pc5-пульсаций, наблюдаемых радаром в ночной ионосфере, не являются альфвеновскими волнами. Требуемыми характеристиками обладают дрейфово-компрессионные волны, частоты которых обычно ниже альфвеновских и зависят от азимутального волнового числа. Таким образом, получен убедительный аргумент в пользу существования дрейфово-компрессионных волн в космической плазме.

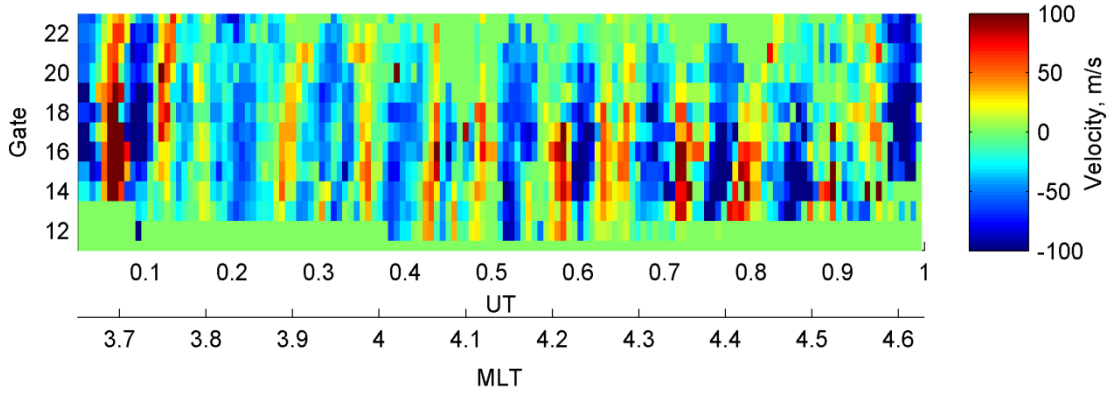


Рис. 144. Пример колебания скорости движения ионосферной плазмы, зафиксированные на Екатеринбургском когерентном декаметровом радаре (событие 25 декабря 2014 г.)

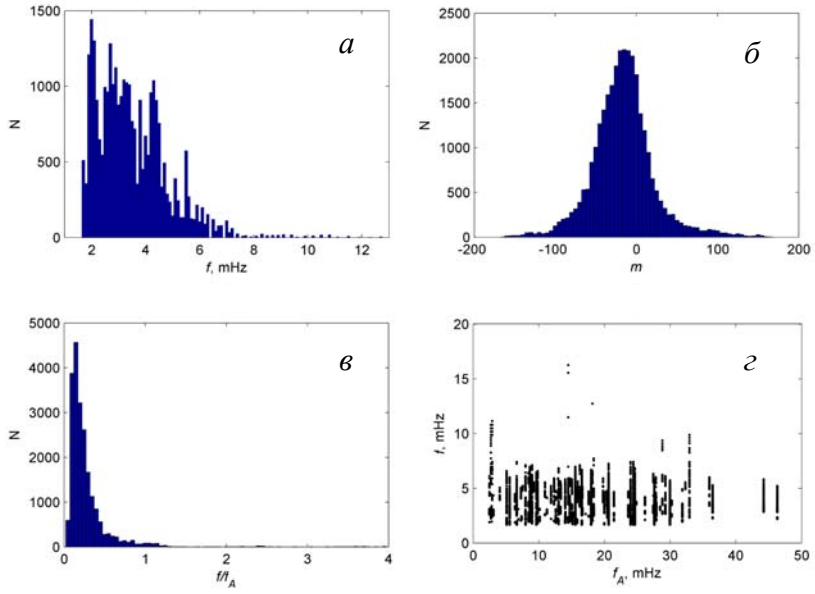


Рис. 145. Зависимость количества событий N (числа периодов зарегистрированных пульсаций) от частоты пульсаций f (*а*), азимутального волнового числа m (*б*) и отношения частоты пульсаций f к альфвеновской частоте f_A (*в*), а также зависимость частоты пульсаций f от альфвеновской частоты f_A (*г*)

Публикации:

1. Челпанов М.А., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Бернгардт О.И., Магер О.В. Наблюдения дрейфово-компрессионных волн с помощью среднеширотного декаметрового когерентного радара // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, №. 2. С. 46–56. DOI: 10.12737/16999.

2. Chelpanov M. A., Mager P. N., Klimushkin D. Yu., Berngardt O. I., Mager O. V. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: an Ekaterinburg Coherent Decameter Radar case study // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 1315–1326. DOI:10.1002/2015JA022155.

3.8.3. Исследование магнитосферных и ионосферных резонаторов для волн типа Pc1

По данным наблюдения УНЧ-колебаний в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН обнаружена слабая, но статистически достоверная зависимость суточной активности колебаний типа Pc1 в ионосферном альфвеновском резонаторе от ориентации межпланетного магнитного поля перед фронтом магнитосферы. Предложена интерпретация результата, сущность которой в том, что электромагнитные флуктуации проникают в маг-

нитосферу из межпланетной среды и воздействуют на ионосферный резонатор. Постановка задачи и метод решения являются частью широкой программы экспериментального и теоретического исследования воздействия межпланетного магнитного поля на режим УНЧ-колебаний магнитосферы. Идея состоит в том, что компоненты магнитного поля перед фронтом магнитосферы преобразуются в совокупность восьми управляющих параметров, имеющих простой физический или геометрический смысл. Параметр $\sigma = \mathrm{sgn}(B_x B_z)$, который был использован при анализе данных наблюдения резонансных колебаний ионосферы, принадлежит к этой совокупности.

Представлены примеры использования техники обработки сигналов, позволяющей выявить наличие эквидистантных частот в спектрах широкополосных колебаний типа Pc1, замкнутых в резонаторы. Применяемая методика обработки сигналов основана на анализе корреляционных функций флуктуаций амплитуды и фазы (APCF) рассматриваемых колебаний. Выявление эквидистантных частот в любом широкополосном спектре производится по наличию связанных с ними периодических пиков на функциях APCF. На примере обработки колебаний одномерного резонатора показано, что связь между собственными частотами в спектре и пиками функций APCF аналогична связи между щелями оптической решетки и изображением интерференционных линий на экране. Предлагаемая техника обработки сигналов позволяет измерить разность двух соседних частот такой «решетки». Такая же аналогия справедлива для двумерного резонатора. Показано, что в этом случае в спектре присутствуют сразу две решетки эквидистантных собственных частот. Каждая из этих решеток соответствует собственным частотам одномерной стоячей волны вдоль каждой из координат двумерного резонатора. Рассмотрено влияние малой неэквидистантности собственных частот на искажения формы и местоположение пиков корреляционных функций. На примерах обработки двух 1-часовых интервалов записей геомагнитных пульсаций продемонстрирована применимость метода APCF для реально регистрируемых магнитосферных колебаний.

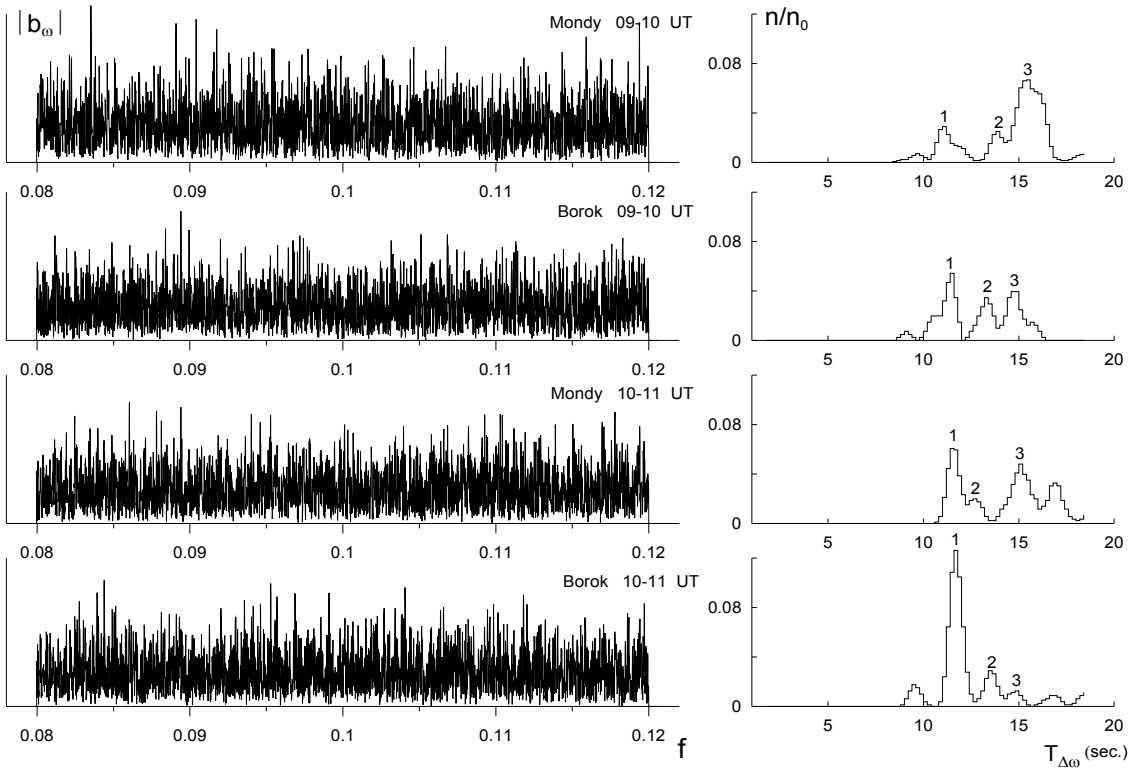


Рис. 146. Результаты обработки часовых записей возмущений магнитного поля Земли методом анализа корреляционных функций флуктуаций амплитуды и фазы

Публикации:

1. Потапов А.С., Рыжакова Л.В., Цэгмэд Б. Метод прогнозирования потока релятивистских электронов на геостационарной орбите // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 582–590.

2. Potapov A.S., Ryzhakova L.V., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of “killer” electron flux at geosynchronous orbit // Acta Astronautica. 2016. V. 126. P. 47–51. DOI:10.1016/j.actaastro.2016.04.017.

3.8.4. Структура акустических волн в атмосфере

Исследована вертикальная структура акустико-гравитационных волн, возникающих в атмосфере. Такие волны могут достигать ионизованных слоев термосферы и магнитосферы, где за счет вовлечения в волновые колебания заряженных частиц приобретать свойства электромагнитных волн и вследствие этого наблюдаться по своим электромагнитным проявлениям в ионосфере и магнитосфере. В частности, с проникновением внутренних гравитационных мод атмосферного волновода в ионосферу связывается такое явление, как перемещающиеся ионосферные неоднородности (ПИВы). Волноводный захват обеспечивает горизонтальное перемещение волн с определенными соотношениями волновых чисел и частоты, остальные беспрепятственно проходят в термосферу и выше в магнитосферу. Ионосферные возмущения, вызываемые акустико-гравитационными волнами, в свою очередь, могут вызывать магнитосферные геомагнитные пульсации диапазона Pc3-5.

Специфической особенностью распространения акустико-гравитационных волн является влияние диссипации на характер вертикальной структуры волн. В связи с тем, что плотность атмосферы быстро убывает вверх, амплитуды волн, удовлетворяющие условию линейности вблизи поверхности Земли (малости возмущения по сравнению с фоновой плотностью), не удовлетворяют ему в более высоких слоях. Однако наличие диссипации приводит к уменьшению амплитуды при распространении волны, что, вообще говоря, может сохранить ее линейность. Корректный учет диссипации требует решения системы дифференциальных уравнений высокого порядка в неоднородной среде, что сильно усложняет задачу. В работе развит метод построения волнового решения с учетом как теплопроводности, так и вязкости посредством сшивки решений, получаемых с использованием приближения слабой диссипации в нижних слоях атмосферы и изотермического приближения в термосфере. Для решения задачи с источником акустико-гравитационных волн в атмосфере предложен способ построения с помощью полученного решения над источником двумерной матрицы Грина, полноценно учитывающей диссипацию.

С использованием метода [3] исследована вертикальная структура акустико-гравитационных волн как свободно распространяющихся вверх, так и захваченных в приземном волноводе. Показано, что с учетом диссипации возможно существование волн, сохраняющих линейность на всех высотах. Диссипативное описание волноводных мод сравнивается с описанием на основе бездиссипативных уравнений, как точным, так и в ВКБ-приближении. Показано, что дисперсионные соотношения, рассчитываемые любым из методов, близки друг другу и хорошо согласуются с наблюдаемыми характеристиками ПИВ. С использованием рассчитанных дисперсионных соотношений и характеристик волнового распространения просачивающегося возмущения получено очень хорошее соответствие основным характеристикам наблюдаемых ПИВ, таким как отношение между горизонтальными масштабами и волновыми периодами, способность распространения на многие тысячи километров без существенного затухания, обратное направление вертикальной фазовой скорости, малые значения вертикальной фазовой скорости, специфичный наклон фазового фронта. Преимущество использования диссипативного решения над источником состоит в том, что в отличие от остальных методов оно позволило адекватно описать пространственную структуру возмущения в верхней атмосфере.

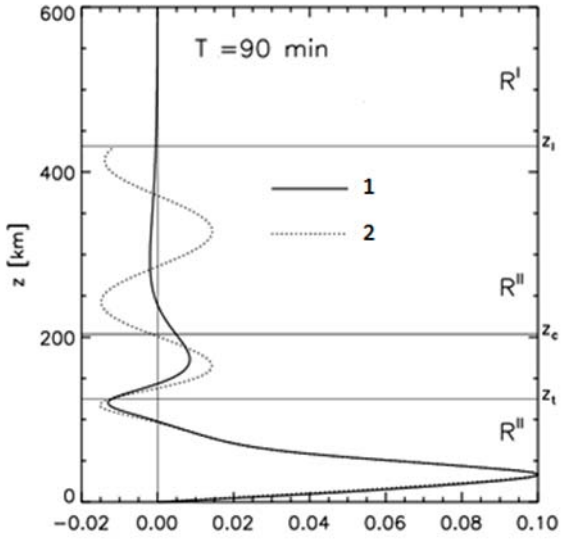


Рис. 147. Сравнение вертикальных структур волноводных решений с учетом (1) и без учета диссипации (2)

Публикации:

1. Dmitrienko I. S., Rudenko G. V. Oscillations of a vertically stratified dissipative atmosphere. I. Solution above source // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2016. V. 142, P. 120–136. DOI:10.1016/j.jastp.2016.02.003.

2. Rudenko G., Dmitrienko I. Penetration of internal gravity waveguide modes into the upper atmosphere // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2. P. 44–55. DOI: 10.12737/10413.

3. Rudenko G.V., Dmitrienko I.S., Oscillations of a vertically stratified dissipative atmosphere. II. Low frequency trapped modes // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2016. V. 142. P. 137–149. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.02.004.

3.8.5. Исследование пространственно-временной структуры возмущений в сдвиговых течениях

Ранее разработанный участниками проекта численный метод (Analytical-Based Numerical Method) реализован для исследования нелинейной эволюции начального локализованного вихревого возмущения в виде гауссовского тора (так называемый гауссовский вихрь) в течениях с однородным широм скорости (компоненты скорости являются линейными функциями декартовых координат), включая гиперболическое, эллиптическое течения, а также безграничное течение Куэтта (simple shear). Показано, что в результате нелинейной эволюции в течениях с открытыми линиями тока (гиперболическое течение и течение Куэтта) формируются когерентные структуры: либо пара параллельных вытянутых областей с противоположным направлением вращения (counter-rotating vortex pairs), либо шпилькообразные (подковообразные) вихри. Для гиперболических течений доминирующим эффектом является образование вытянутых вихревых пар, а для течения Куэтта вихревые пары образуются из слабо-нелинейных и умеренно-нелинейных начальных вихрей, в то время как сильно нелинейные начальные возмущения порождают шпилькообразные вихри. Для случая эллиптических течений на ранней стадии эволюции формируются шпилькообразные вихри, вихревые пары и вихревые петли, однако на последующей стадии они распадаются в различные вихревые структуры. Изучено влияние начальной амплитуды возмущения и его ориентации и определена оптимальная ориентация, при которой достигается максимальное усиление вихря.

В устойчиво стратифицированных сдвиговых течениях с монотонно растущим ограниченным профилем скорости $V_x = U(z)$ без точек перегиба и двумя пикноклинами малой, но конечной толщины, в которых плотность изменяется непрерывно, изучена картина

устойчивости двух основных мод колебаний – безузловой (m=0) и одноузловой (m=1). Проведенный анализ показал, что, как и в изученных ранее течениях с двумя скачками плотности, где этими модами исчерпывается весь спектр собственных колебаний, колебания теряют устойчивость при фазовом резонансе с течением, когда их фазовая скорость c попадает в диапазон изменения скорости течения. При этом область неустойчивости моды m = 0 не имеет внутренней структуры, а область неустойчивости моды m = 1 рассечена нейтральными кривыми.

Выявлены два принципиальных отличия течений с непрерывным изменением плотности. Во-первых, на диаграмме волновое число – число Ричардсона (k–J диаграмме) области неустойчивости мод простираются уже не до оси абсцисс (J = 0), а отделены от нее щелью конечной ширины, растущей как при увеличении, так и при уменьшении k. Это свидетельствует о трехмерном характере неустойчивости при достаточно слабой, но конечной стратификации течения. Во-вторых, каждая из нейтральных кривых $c = U2$ и $c = cN$, рассекавших область неустойчивости моды m=1 в течении со скачками плотности, при непрерывном ее изменении расщепляется на две, благодаря чему внутри области неустойчивости появляются лакуны, в которых нет собственных колебаний.

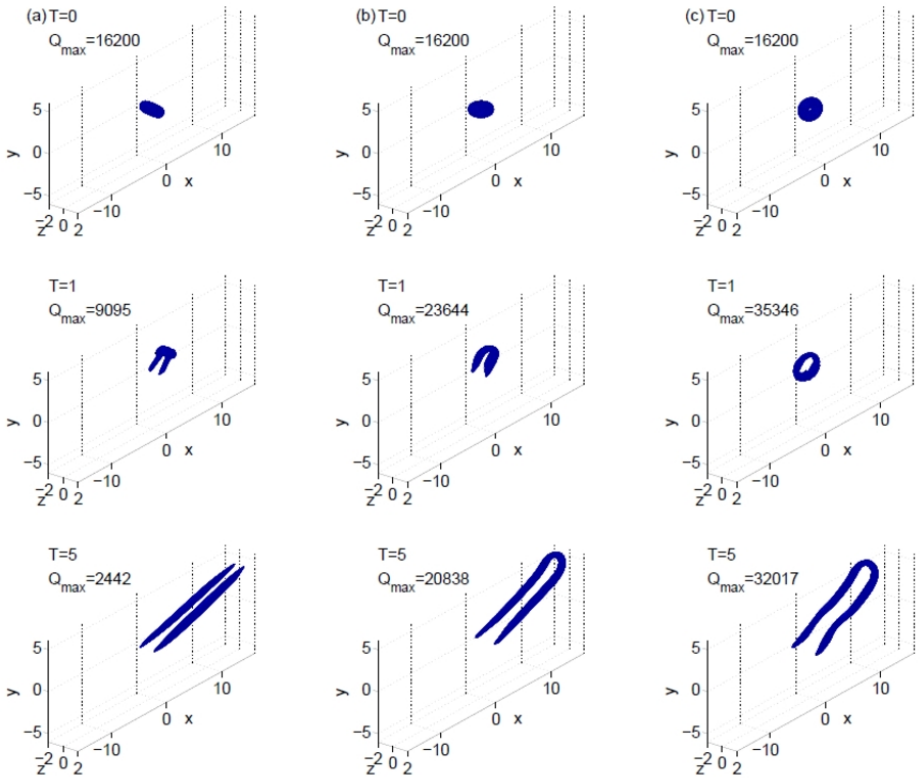


Рис. 148. Эволюция сильно нелинейного начального гауссовского вихря в безграничном течении Куэтта $U(y) = y$: *a* — начальный угол ориентации нормали к плоскости тора составляет 50° к положительному направлению оси x; *b* — плоскость тора горизонтальна; *c* — начальный угол ориентации нормали к плоскости тора составляет 130° к положительному направлению оси X. Параметр Q характеризует интенсивность вихря. Показаны изоповерхности Q/Q_{max} =0.3. Видно, что в зависимости от начальной ориентации и момента времени T формируются различные когерентные структуры (шпилькообразные вихри или вытянутые вихревые пары)

Публикации:

Churilov S. M. Stability of shear flows with multilayered density stratification and monotonic velocity profiles having no inflection points // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2016. V. 110. P. 78–108. DOI:10.1080/03091929.2015.1119273.

Список использованных источников:

1. Pilipenko V. A., Klimushkin D. Yu., Mager P. N., Engebretson M. J., Kozyreva O.V. Generation of resonant Alfvén waves in the auroral oval // Ann. Geophys. 2016. V. 34. P. 241–248. DOI:10.5194/angeo-34-241-2016.

2. Chelpanov M. A., Mager P. N., Klimushkin D. Yu., Berngardt O. I., Mager O. V. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: an Ekaterinburg coherent decameter radar case study // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 1315–1326. DOI:10.1002/2015JA022155.

3. Dmitrienko I.S., Rudenko G.V. Oscillations of a vertically stratified dissipative atmosphere. I. Solution above source // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2016. V. 142, P. 120–136. DOI:10.1016/j.jastp.2016.02.003.

3.9. Исследование и мониторинг магнитосферно-ионосферных возмущений с использованием пространственно-разнесенных геофизических комплексов

3.9.1. Круглогодичный круглосуточный мониторинг

Он включает круглогодичный круглосуточный мониторинг следующих параметров околоземного космического пространства на обсерваториях ИСЗФ СО РАН:

- геомагнитного поля Земли в различных диапазонах частот;
- ионосферы в средних и авроральных широтах;
- атмосферного электричества;
- ПЭС по данным геостационарных спутников;
- инфразвука;
- полярных сияний в авроральных и средних широтах.

Рис. 149. Расположение обсерваторий, проводящих наблюдения в рамках проекта «Меридиан»

Ниже проводятся расположение наблюдательных средств в обсерваториях Института, составы комплексов и их технические характеристики:

- магнитные вариационные и абсолютные наблюдения — Иркутск, Норильск.
- геомагнитные пульсации — Монды, Узур, Исток.
- измерения электрического поля в приземном слое воздуха — Иркутск, Узур, Монды, Торы.
- приемники сигналов спутников GPS/ГЛОНАСС — Иркутск, Монды, Узур, Усолье, Листвянка, Торы, Сарма, Максимиха, Норильск, Исток.
- мониторинг состояния ионосферы (дигизонд DPS-4) — Иркутск, Норильск.
- регистрация инфразвука — Торы.
- регистрация свечения ночного неба (камеры всего неба, фотометры, спектрометры) — Торы, Исток.

3.9.2. Мониторинг параметров геомагнитного поля Земли

Мониторинг параметров геомагнитного поля Земли в различных диапазонах частот осуществляется в магнитной обсерватории «Иркутск» (п. Патроны), Байкальской магнитотеллурической обсерватории (БМТО, Узур, оз. Байкал), Саянской солнечной обсерватории (ССО, с. Монды, Геофизической обсерватории (ГФО, Торы), на Норильской КМИС. На этих станциях функционирует следующая геофизическая аппаратура.

Вариационные измерения:

- трехкомпонентная феррозондовая станция Lemi-018;
- трехкомпонентная станция «Кварц»;
- трехкомпонентная магнитовариационная станция NVS.
- цифровая трехкомпонентная феррозондовая станция Lemi-008;
- аналоговая станция «Кварц» на основе датчиков Боброва с выходом на ПК;

Абсолютные измерения магнитного поля Земли:

- оверхаузеровский протонный магнитометр POS-1 полного вектора;
- феррозондовый деклинометр-инклинометр MAG-01H THEO 015 B для регистрации наклонения и склонения ЭМПЗ.

Данные вариаций геомагнитного поля проходят следующие этапы получения и обработки (на примере магнитной обсерватории «Иркутск»:

1. Регистрация для магнитометров Lemi-018 и POS-1 проводятся в цифровом виде, для кварцевых магнитометров «Кварц» и «МВС» — в аналоговом. Магнитометры расположены в абсолютном и вариационном павильонах на удалении 50 и 100 м от технического павильона.

2. Передача данных в технический павильон, оцифровка для кварцевых магнитометров, формирование первичных файлов секундных значений.

3. Обнаружение и интерполяция сбоев секундных данных.

4. Формирование одноминутных данных с помощью фильтра Гаусса.

5. Сопоставление минутных вариаций и абсолютных значений, полученных по результатам абсолютных наблюдений на деклинометре/инклинометре. Определение базисных значений, получение абсолютных рядов наблюдений.

6. Формирование файлов данных для отправки в Intermagnet и на ftp-сервер ИСЗФ СО РАН.

7. Отправка файлов на ftp://ftp.iszf.irk.ru/magnit/tool3/.

8. В автоматическом режиме данные из последних файлов выставляются на сайте ИСЗФ СО РАН http://magnit.iszf.irk.ru/index.php?page=patron1.

Наблюдения геомагнитных пульсаций:

- трехкомпонентный индукционный магнитометр Lemi-30 (частотный диапазон 0–30 Гц — ССО, пункт «Исток»)

В БМТО функционирует универсальная многокомпонентная станция Lemi-418, ко-

торая регистрирует:

- вариации магнитного поля Земли в частотном диапазоне 0–1 Гц (трехкомпонентный феррозонд),
- трехкомпонентные измерения магнитных составляющих геомагнитных пульсаций (индукционный нанотесламетр в частотном диапазоне 0.001–200 Гц),
- земные токи, частотный диапазон 0.001–200 Гц (компоненты $E_{с–ю}$, $E_{в–з}$, E_z.)

Ежедневно данные о магнитном поле Земли передаются на сервер Института по интернету.

Публикации:

1. Рахматулин Р.А., Липко Ю.В., Пашинин А.Ю., Алешков В.М. Исследование пространственно-временной структуры неоднородностей геомагнитного поля Байкальской рифтовой зоны // Актуальные проблемы науки Прибайкалья: Сборник статей. Иркутск, изд-во ИНЦ СО РАН, 2015. С. 194–200.

2. Baru N.A., Koloskov A.V., Yampolsky Y.M., Rakhmatulin R.A. Multipoint observations of ionospheric Alfvén resonance // Adv. Astronomy and Space Phys. 2016. V. 6. Iss. 1. P. 45–49. DOI: 10.17721/2227-1481.6.45-49.

3. Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Ойнац А.В., Пашинин А.Ю., Райта Т., Цегмэд Б. Первый опыт оценки ионного состава над ионосферой по данным о частотной структуре излучения ИАР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 204–2014.

3.9.3. Ионосферные наблюдения

В ИСЗФ СО РАН непрерывный мониторинг состояния ионосферы ведется с помощью цифровых ионозондов DPS-4, расположенных в Норильске (69.4° N, 88.1° E) и Иркутске (52.3° N, 104.3° E).

Ионозонд DPS-4 является одним из наиболее современных и распространенных средств радиозондирования ионосферы. Он состоит из основного блока, монитора, двух передающих антенн, четырех приемных антенн с поляризационными ключами, GPS-приемника и блока батарей резервного питания. Эта станция позволяет измерять следующие параметры ионосферы:

- амплитуду (максимальное разрешение 3/4 дБ),
- фазу (максимальное разрешение 2 р /256 рад),
- задержку (максимальное разрешение 16.66 мкс),
- доплеровский сдвиг частоты (максимальное разрешение 0.024 Гц),
- вертикальный угол прихода,
- азимутальный угол прихода.

Диагностика ионосферы состоит из восстановления профиля электронной концентрации и измерения скорости дрейфа ионосферной плазмы. Восстановление профиля электронной концентрации осуществляется на основе обработки ионограмм. Измерение скорости дрейфа ионосферной плазмы основано на измерении характеристик сигналов, отраженных от ионосферных неоднородностей.

3.9.4. Мониторинг параметров атмосферного электричества

Мониторинг параметров атмосферного электричества осуществляется на разработанном в Институте и здесь же изготовленном флюксметре [1]. Сеть таких приборов установлена и функционирует в обсерваториях Института: «Иркутск», БМТО, ГФО, ССО. Этот прибор осуществляет мониторинг электрического потенциала в приземном слое воздуха, а также проводимость электрического тока в атмосфере.

3.9.5. Непрерывный круглогодичный мониторинг вариаций полного электронного содержания по данным сети разнесенных приемников сигналов ГНСС-систем

Полное электронное содержание проводится по данным геостационарных спутников GPS/ГЛОНАСС.

Развертываемая в ИСЗФ СО РАН сеть ГНСС-приемников на текущий момент насчитывает 9 станций, расположенных по полигонах Института: г. Иркутск, г. Усолье-Сибирское, п. Листвянка, п. Узур, п. Торы, п. Монды, п. Сарма, п. Максимиха, пункт Исток, г. Норильск. Основу станций ГНСС-наблюдения составляют приемники фирмы Javad, позволяющие вести наблюдения со скважностью до 50 Гц, однако параметры каналов передачи данных ограничивают частоту наблюдений до 1 Гц. Типичное разрешение по времени в мировой практике составляет 30 с, поэтому получаемые нами данные могут рассматриваться как высокочастотные и представлять интерес для исследования мелкомасштабных структур в ионосфере. Приемники обеспечивают кодовые, фазовые и амплитудные измерения на частотах L1 и L2 одновременно по всем находящимся в зоне видимости спутникам GPS, ГЛОНАСС, GALILEO. Данные измерений приемника поступают непосредственно в управляющий компьютер, где производится их запись и временное хранение. После минимальной обработки и сжатия данные передаются со станций на сервер ИСЗФ, где хранятся и предоставляются сотрудникам для исследований.

3.9.6. Мониторинг параметров инфразвука

Регион Байкальской рифтовой зоны относится к зоне высокой сейсмической активности, где возможно проявление акустико-гравитационных волн инфразвукового диапазона. Поскольку нет объективной привязки ко времени сейсмического процесса, предполагается регистрация сигналов в квазинепрерывном режиме. Разработана структура файлового хранения инфразвуковых данных в виде некоторой базы данных по годам и дате записи. Структура и состав измерительного комплекса определяется методом измерения движущейся интерферометрической картины над поверхностью Земли (3-элементный интерферометр).

Инфразвуковая станция ИСЗФ СО РАН предназначена для мониторинга инфразвуковых сигналов в атмосфере и расположена в 150 км от Иркутска на территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.79° N, 103.09° E). Станция оснащена инфразвуковой аппаратурой ИСЗФ СО РАН, которая установлена в трех выносных павильонах с апертурой 500 м и представлена блоками инфразвуковых микробарографов, разработанных в ИСЗФ СО РАН [2], устройством калибровки пистонфонного типа и системой шумоподавления в виде 2-дюймовой трубной линии длиной 60 м с 20 входными капиллярами. Инфразвуковая информация передается в центральный пункт для регистрации посредством кабельных линий. Регистрирующая часть сопряжена с 12-разрядным дифференциальным аналогоцифровым преобразователем. Основные характеристики инфразвуковых микробарографов с усилителем следующие: динамический диапазон 80 дБ, полоса частот 0.02–1 Гц, собственный шум 0.01 мкбар, чувствительность 0.05 В/мкбар.

3.9.7. Мониторинг светимости ночного неба в средних широтах

Приобретенный в 2014 г. спектрограф «Shamrock-03i» расширил возможности оптических наблюдений на всем оптическом комплексе Геофизической обсерватории (с. Торы, Республика Бурятия, (51° N, 103° E), которая в 2016 г. отработала в штатном режиме в комплектации прошлого года [3]. Спектрограф включает следующие блоки.

1. Базовый блок спектрографа SR-303i-B, фокусное расстояние 303 мм, относительное отверстие 1:4, два выхода для фоточувствительных узлов.

2. Автоматическая поворотная турель для смены дифракционных решеток.
3. Автоматическая входная щель.
4. Автоматический затвор.
5. Обрезающий фильтр СЗС-24.
6. Дифракционные решетки
   - SR3-GRT-0600-1200 (600 л/мм, блеск 1200 нм).
   - SR3-GRT-1200-0500 (1200 л/мм, блеск 500 нм)
   - SR3-GRT-2400-0300 (2400 л/мм, блеск 300 нм)

7. Фоточувствительный узел Andor DU420A-BV, интерфейс USB, формат 1024×256 пикселей, размер пикселя 26×26 мкм, минимальная температура –100 °С.
8. Программный пакет управления оборудованием и сбора данных Solis.
9. Программа, разработанная для экспериментальных наблюдений в автоматическом режиме на основе программного пакета Solis.

Во время опытной эксплуатации 2015–2016 гг. прибор работал круглосуточно. Параметры регистрации (экспозиция и ширина входной щели) изменялись автоматически в зависимости от времени суток. В темное время суток измерения проводятся в следующей конфигурации:

- Дифракционная решетка SR3-GRT-1200-0500 (1200 шт/мм, блеск 500 нм).
- Ширина входной щели 200 мкм.
- Ориентация и поле зрения прибора примерно соответствует спектрографу САТИ-1М (http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr, ориентирован на север с зенитным углом ~60°. Поле зрения ~25º вдоль входной щели и ~0.5º поперек).
- Полный вертикальный биннинг.
- Серия из 30 кадров с экспозицией 1 с. Кадры серии суммируются.
- Обрезающий фильтр СЗС-24.

Полный рабочий спектральный диапазон составляет 492–896 нм. Одновременно регистрируется спектральный диапазон шириной ~60 нм. Полный спектральный диапазон регистрируется за 8 этапов.

На рис. 150 показан общий вид спектрометра во время опытной эксплуатации в ГФО.

Рис. 150. Общий вид прибора во время опытной эксплуатации в ГФО

3.9.8. Модернизация и профилактика существующих геофизических комплексов

3.9.8.1. Многокомпонентный геофизический комплекс Норильской КМИС

В последние годы КМИС была оснащена современными средствами регистрации и первичной обработки данных наблюдений, и в настоящее время на ней функционирует следующий многокомпонентный геофизический комплекс.

Вариационные наблюдения — функционируют дублирующие магнитовариационные станции:

- цифровая трехкомпонентная феррозондовая станция Lemi-008,
- аналоговая станция «Кварц» на основе датчиков Боброва с выходом на ПК,
- кварцевая магнитовариационная станция с цифровым выходом.

Абсолютные измерения магнитного поля Земли:

- оверхаузеровский протонный магнитометр POS-1 полного вектора,
- феррозондовый деклинометр-инклинометр MAG-01H THEO 015 B для регистрации наклонения и склонения ЭМПЗ.

Вертикальное зондирование ионосферы — цифровой дигизонд DPS-4 (работает с 2002 г.). Основное назначение — регистрация ионограмм вертикального зондирования с последующим расчетом профиля электронной концентрации и следующих ионосферных характеристик:

- амплитуды (максимальное разрешение 3/4 дБ),
- фазы (максимальное разрешение 2 p /256 рад),
- задержки (максимальное разрешение 16.66 мкс),
- доплеровского сдвига частоты (максимальное разрешение 0.024 Гц),
- вертикального угла прихода,
- азимутального угла прихода.

В 2016 г. были проведены профилактические и ремонтные работы:

профилактическое обслуживание DPS-4,

- замена неисправных плат синхронизатора, осциллятора, антенного переключателя;
- настройка программного обеспечения DOS-компьютера;
- профилактическое обслуживание WINNT компьютера;
- замена вышедшего из строя жесткого диска WINNT компьютера;
- настройка программного обеспечения WINNT компьютера;
- настройка передачи данных на ftp-сервер.

Были проведены следующие мероприятия по поддержанию работоспособности и обслуживанию антенного комплекса радиофизических инструментов Норильской КМИС:

- профилактическое обслуживание приемных антенн DPS-4,
- очистка просеки от кустов и деревьев передающей антенны DPS-4,
- профилактика изоляторов передающей антенны DPS-4,
- проверка растяжек мачты передающей антенны DPS-4.

Наклонное зондирование ионосферы: ЛЧМ-ионозонд

В 2014–2016 гг. на радиофизическом комплексе ЛЧМ-установки Норильской КМИС были проведены регламентные и ремонтно-профилактические работы. В настоящее время эта установка работает в штатном режиме.

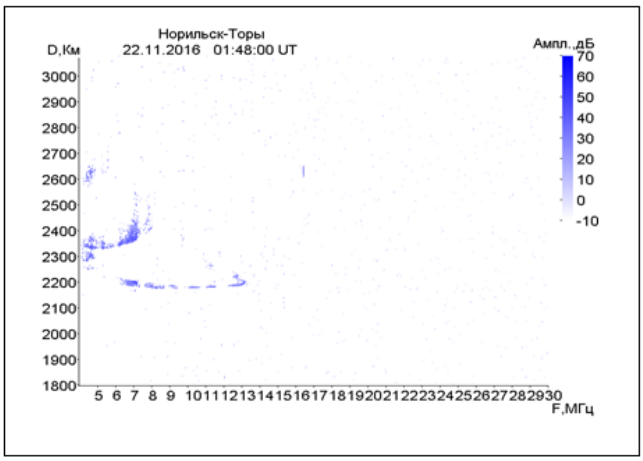


Рис. 151. Ионограмма наклонного зондирования на трассе Норильск–Торы

3.9.8.2. Модернизация компонент геофизического комплекса на Норильской КМИС

ЛЧМ-ионозонд

- Проведена модернизация ЛЧМ-ионозонда: заменен на устройство нового поколения формирователь прямого цифрового синтеза, переустановлена поёд ОС Windows управляющая программа.
- Отремонтированы и настроены блоки усилителя мощности передатчика «Кедр».
- Отремонтирована и настроена система запуска и отключения от компьютера передатчика «Кедр».
- Проведена профилактика и выполнен ремонт передающей антенны.
- Установлена новая активная рамочная приемная антенна на приемном комплексе, позволившая за счет диаграммы направленности снизить влияние работы передатчика DPS-4 на работу приемника ЛЧМ-сигналов.

Публикации:

Пономарчук С.Н., Ким А.Г., Котович Г.В., Романова Е.Б. Применение модели ионосферы и плазмосферы для моделирования ионограмм наклонного зондирования с учетом перемещающихся ионосферных возмущений // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: Материалы [Электронный ресурс]. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016. В6-В10. [url = http://symp.iao.ru/files/symp/aoo/22/Section% 20B.pdf]

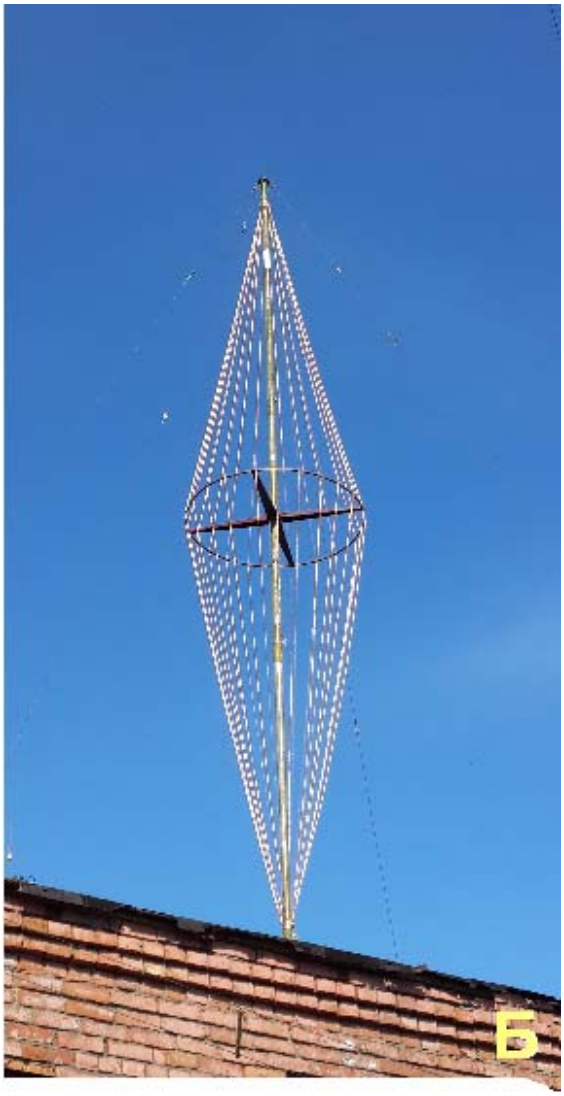


Рис. 152. Приемная антенна ЛЧМ-установки

Магнитовариационная станция (МВС)

На Норильской КМИС запущена в постоянную круглосуточную работу кварцевая магнитовариационная станция (МВС, изготовлена Нечаевым С.А. на Иркутской магнитной обсерватории, смонтирована в вариационном павильоне КМИС, настроена и откалибрована). Данные с МВС поступают на компьютер в техническом здании и обрабатываются в соответствии со стандартами Intermagnet.

Проведена ревизия заземления в абсолютном павильоне. Сопротивление заземления составляет 80 Ом и выше, что недопустимо для работы высокоточного магнитометра POS-1 и вызывает сильные электромагнитные помехи. С целью их снижения была изменена схема питания аппаратуры с использованием источника бесперебойного питания двойного преобразования APCSURT. В настоящее время POS-1 устойчиво работает практически без помех.

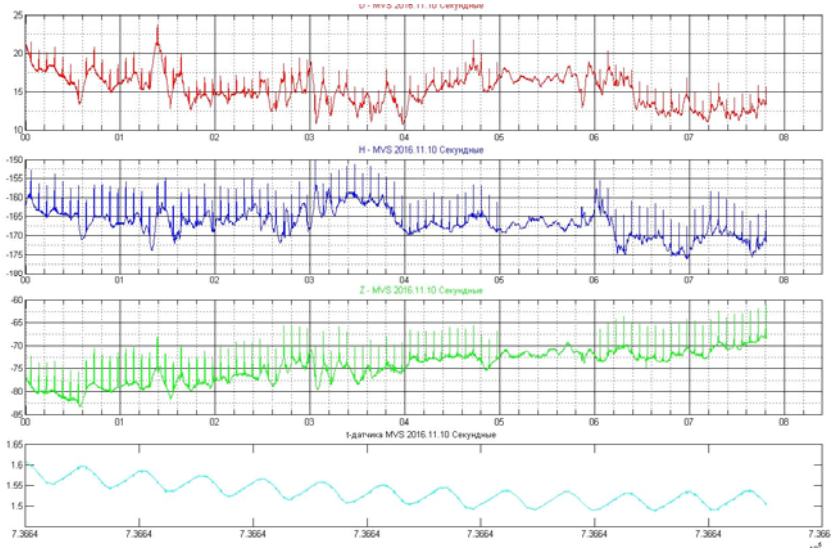


Рис. 153. Пример данных МВС. Помехи от ЛЧМ-передатчика между 05 и 06 ч ЛЧМ-передатчик был выключен

Проведена ревизия и выполнен ремонт электроснабжения вариационного павильона, составлены схемы. Отрегулирована система термостабилизации. Проведено полное техническое обслуживание аппаратуры и компьютеров, используемых в магнитометрических измерениях. В частности, восстановлена возможность устойчивой передачи данных на сервер ftp ИСЗФ СО РАН и возможность удаленного управления компьютерами сбора и обработки магнитных данных Норильской КМИС.

Проведено обучение техников-наблюдателей, выявлены и исправлены ошибки в проведении наблюдений и обработки данных.

Дигизонд DPS-4

Осуществлено:

- проведение профилактических и ремонтных работ на комплексе радиофизических инструментов Норильской комплексной магнитно-ионосферной станции,
- профилактическое обслуживание DPS-4;
- замена неисправных синхронизатора, осциллятора, антенного переключателя;
- настройка программного обеспечения DOS-компьютера;
- профилактическое обслуживание WINNT компьютера;
- замена вышедшего из строя жесткого диска WINNT компьютера;
- настройка программного обеспечения WINNT компьютера;
- настройка передачи данных на ftp-сервер;

- проведение мероприятий для поддержания работоспособности и обслуживания антенного комплекса радиофизических инструментов Норильской комплексной магнитно-ионосферной станции:
  - профилактическое обслуживание приемных антенн DPS-4,
  - очистка просеки от кустов и деревьев передающей антенны DPS-4,
  - профилактика изоляторов передающей антенны DPS-4,
  - проверка растяжек мачты передающей антенны DPS-4.

3.9.9. Выносная точка «Исток» Норильской КМИС

Рис. 154. Вид выносной точки «Исток» с элементами инфраструктуры

В настоящее время на выносной точке «Исток» функционирует следующий геофизический комплекс.

1. Индукционный магнитометр Lemi-30 (частотный диапазон 0–30 Гц) для регистрации геомагнитных пульсаций;

2. Развернута и запущена в работу станция спутникового мониторинга ионосферы на базе приемника сигналов ГЛОНАСС/GPS Javad-DELTA-G3T с антенной RingAnt-G3T и промышленного компьютера eBox-3300MX;

3. Оптический комплекс, включает следующие компоненты.

- Спектрограф «Shamrock-303i»;
- Широкоугольная обзорная камера CSDU-285-C с ПЗС-матрицей SONY CCD ICX285AQ для регистрации пространственной картины вариаций излучения ночной атмосферы в спектральном RGB-диапазоне. Поле зрения камеры ~100º. Экспозиция 15 с;
- Широкоугольная камера «Видеоскан-11002» для исследования пространственного распределения вариаций излучения атмосферы в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Поле зрения камеры ~140º. Экспозиция 30 с;
- Широкоугольная камера CSDU-423-1 для исследования пространственного распределения вариаций интенсивности эмиссии атомарного кислорода в линии 630 нм. Поле зрения камеры ~70º. Экспозиция 30 с;
- Широкоугольная камера CSDU-423-2 для исследования пространственного распределения вариаций излучения атмосферы в спектральном диапазоне 420–530 нм. Поле зрения камеры ~70º. Экспозиция 30 с;

• Широкоугольная обзорная камера SDU-415C с ПЗС-матрицей SONY CCD ICX415AQ в термоизолированном кожухе для регистрации пространственной картины вариаций излучения ночной атмосферы в спектральном RGB-диапазоне. Поле зрения ~100°. Экспозиция 30 с.

4. Установка наклонного зондирования (ЛЧМ-установка).

На рис. 155 приводится ионограмма, полученная на установке наклонного зондирования на ст. «Исток» на трассе Исток–Хабаровск.

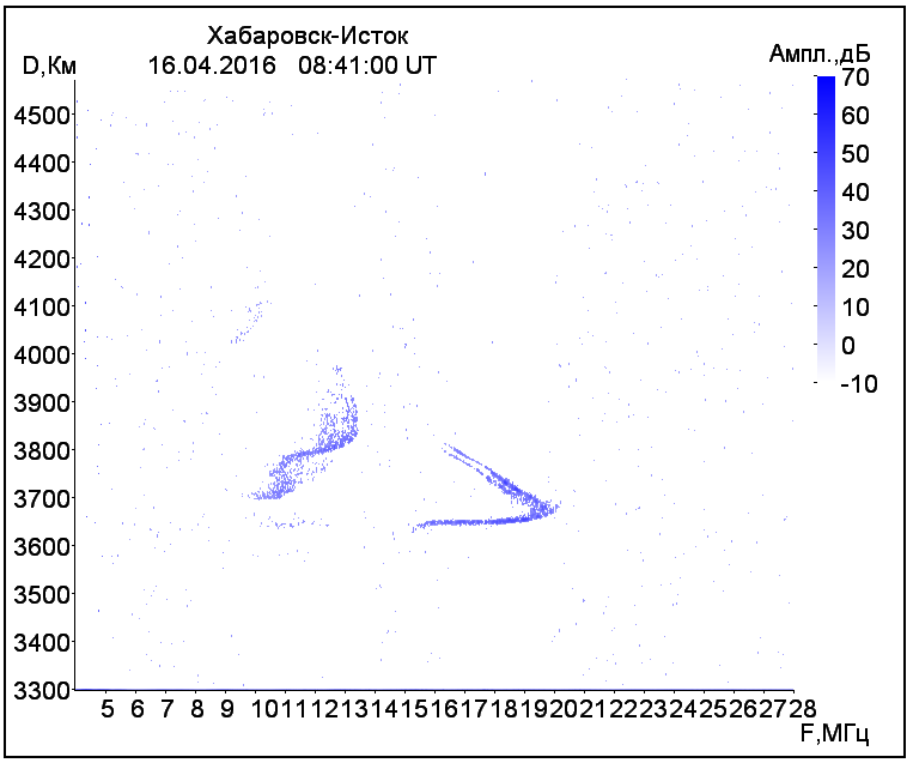


Рис. 155. Ионограмма, полученная на установке наклонного зондирования (ст. «Исток»)

Рис. 156. Оптический двойной купол для наблюдения полярных сияний

В 2016 г. на ст. «Исток» были проведены ремонтные, профилактические и изыскательские работы по следующим направлениям.

3.9.9.1 Оптическое оборудование

В апреле 2016 г. проведены профилактические работы на оптическом оборудовании ст. «Исток». На спектрометр «Shamrock-303i» установлен автоматический барабан фильтров. Спектрометр запущен в круглосуточном режиме (опытная эксплуатация). Получены данные (серия измерений с Полярной звездой в поле зрения спектрометра) для последующей калибровки. Создано программное обеспечение для предварительной обработки данных ПЗС-камер [4].

В октябре 2016 г. заменены интерференционные фильтры на широкоугольных камерах «Видеоскан-11002», CSDU-423-1 и CSDU-423-2.

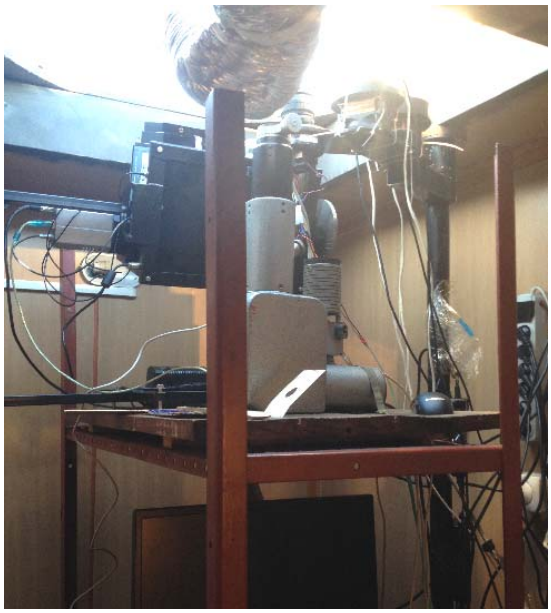


Рис. 157. Модернизированный оптический комплекс на базе спектрометра «Shamrock-303i»

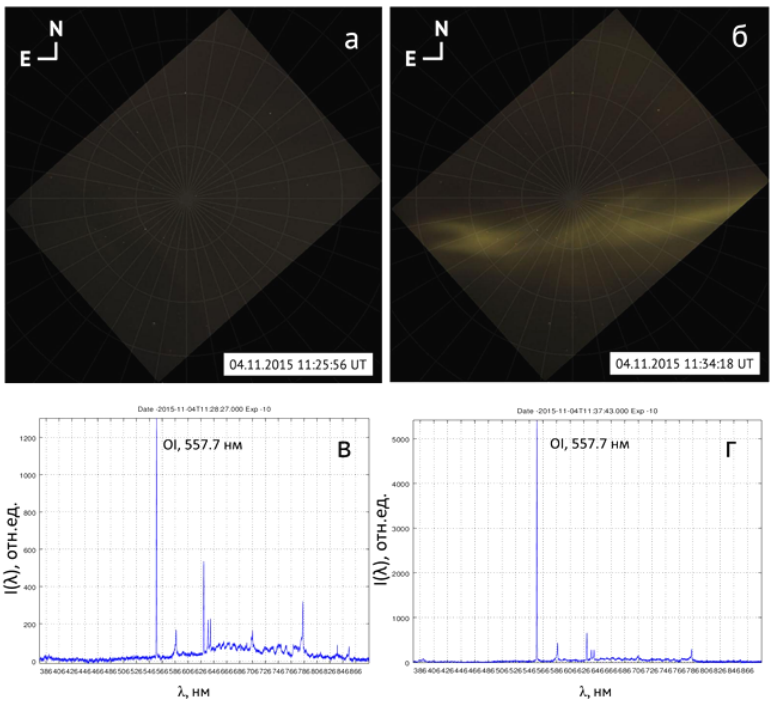


Рис. 158. Кадры, полученные с помощью камеры CSDU-285-C 4 ноября 2015 г. в 11:25:56 (*а*) и 11:34:18 UT (*б*) и соответствующие им спектры (*в*, *г*), измеренные с помощью спектрометра «Shamrock-303i». На кадры камеры наложена координатная сетка с шагом 10° по углу места и азимуту. Центр координат в зените

Для калибровки спектрометра «Shamrock-303i» по длинам волн и проверки чувствительности в разных спектральных диапазонах был рассчитан накопленный спектр за 110 ч наблюдений. Проведена работа по идентификации основных наблюдаемых эмиссий.

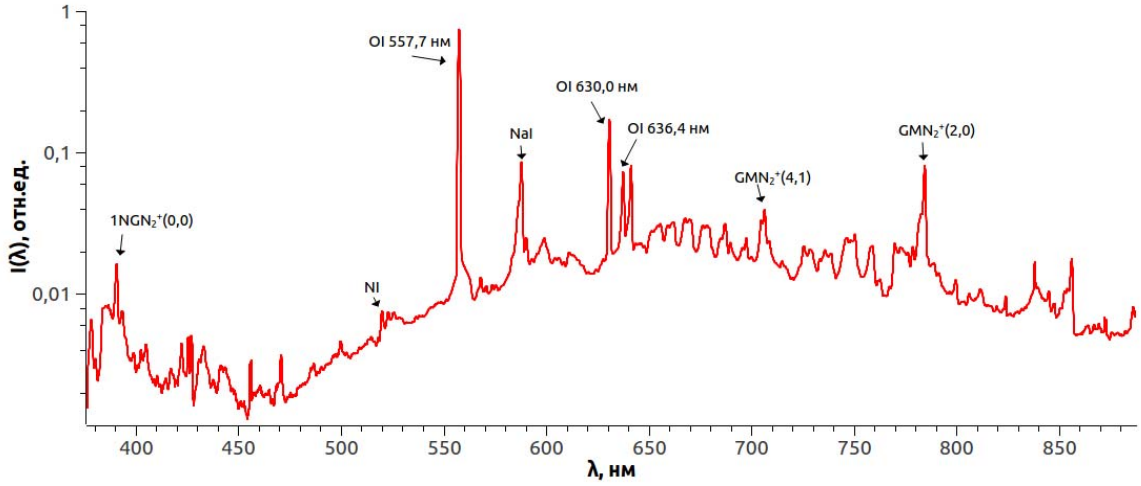


Рис. 159. Накопленный спектр, полученный на станции «Исток» с 31 октября по 12 ноября 2015 г. (~110 ч) в диапазоне 377–880 нм

3.9.9.2. Подготовительные работы для установки магнитовариационной станции (МВС)

На выносной точке «Исток» Норильской КМИС проведены работы по подготовке площадки для размещения магнитовариационной станции (МВС) [5]. С этой целью:

1. На предварительно выбранном в 2015 г. месте размечена прямоугольная площадка размером 50×70 м. С шагом 5 м вбиты деревянные колья.

2. Проведена площадная магнитная съемка над вбитыми колышками на высоте 1 м с использованием протонного магнитометра POS-1. По ее результатам проведен расчет градиентов естественного магнитного поля и определена точка с наименьшими градиентами для размещения МВС.

3. Проведена проверка размеченной площадки на наличие металлических предметов, которые могут искажать естественное геомагнитное поле. Для этой цели использовался профессиональный металлодетектор MineLabSafari. Было удалено несколько железных гвоздей и банок. В целом, площадка соответствует требованиям для размещения МВС.

4. Проведены абсолютные наблюдения трех компонент геомагнитного поля. Наблюдения осложнялись низкими температурами. Наблюдения подтвердили результаты 2015 г.

Рис. 160. Проверка размеченной площадки на наличие металлических предметов на выносной точке «Исток» профессиональным металлодетектором MineLabSafari

Рис. 161. Проведение абсолютных магнитных наблюдений на выносной точке «Исток»

3.9.9.3. GPS-наблюдения

Постоянный мониторинг за стабильностью и непрерывностью измерений в течение года.

3.9.10. Создание специализированного сервера для организации базы экспериментальных данных, получаемых с комплекса геофизических приборов в средних и авроральных широтах

3.9.10.1. Разработка комплексного программного обеспечения для создания специализированной базы данных

В 2016 г. была проведена работа по восстановлению работоспособности сервера Intel® Server Board S5500HCV с 6 дисками WD по 1.8 Тб. Сервер был приобретен с предустановленной системой Windows Server 2003 с лицензией на три года. Продление лицензии стоит 50 тыс. руб., поэтому было принято решение использовать свободное программное обеспечение — один из вариантов операционной системы Linux.

Проведенный анализ операционных систем показал, что наиболее популярной простой и стабильной системой в настоящее время является дистрибутив Linux Mint версии 18. Из Интернет-репозитория скачен дистрибутив, записан на DVD-диск и сделана пробная установка системы на сервер. При этом выяснилось, что имеющийся в составе сервера RAID-контроллер RS2WC08 не используется, RAID-массив не сконфигурирован.

Для решения этой проблемы было сделано обращение в сервисный центр фирмы Intel. После многочисленных консультаций по электронной почте и телефону по рекомендации специалиста серверной фирмы было принято решение обновить микропрограмму контроллера до последней версии. После обновления прошивки контроллера удалось сконфигурировать RAID-массив из четырех дисков уровня 10. Согласно уровню 10, диски разбиваются на две группы, в которые файлы пишутся по частям в каждую группу, что повышает скорость чтения-записи за счет распараллеливания операций по группам. Внутри каждой группы, состоящей из пары дисков, производится зеркалирование записи, т. е. данные пишутся на оба диска для максимальной надежности записи. Созданный массив имеет емкость ~3.6 Тб и используется для хранения уникальных геофизических данных. Еще два диска оставлены вне массива. На них будет установлена операционная система и программное обеспечение для обработки и хранения данных СУБД FireBird, MATLAB и т. п. Эти программы в принципе восстановимы и не требуют повышенных затрат для резервирования.

При дальнейшей работе выяснилась следующая проблема: традиционный вариант разбивки разделов на дисках под файловую систему NTFS не позволяет иметь разделы

более 2.2 Тб. Проведенное изучение способа решения этой проблемы показало, что в системе Linux лучше использовать файловую систему Ext4, которая не имеет ограничений на размер файлов и в отличие от NTFS стабильно работает без дефрагментации дискового пространства. Однако попытка форматирования RAID-массива под файловую систему Ext4 тоже не удалась. Оказалось, что в массиве необходимо использовать новый современный вариант разбивки разделов (таблица GPT, GUID Partition Table). Для форматирования дисков с таблицей GPT была скачена из репозитория и установлена программа GParted, с помощью которой удалось отформатировать весь массив под файловую систему Ext4.

Дополнительно проведено исследование решения следующей проблемы. При настройке RAID-контроллера выяснилось, что только один диск или массив может иметь признак bootable (загружаемый). Эта информация была подтверждена также специалистами сервисного центра, которые утверждали, что загружать ОС можно только с одного диска. Такое ограничение показалось не очень удобным и не совсем обоснованным. Проведенный анализ источников в интернете показал, что возможна установка двух и более вариантов ОС, причем на один или разные диски. Была проведена пробная установка двух различных дистрибутивов Linux на разные диски. Это позволит на один диск установить основную рабочую систему, а на втором устанавливать новые версии ОС для анализа целесообразности их использования.

3.9.10.2. Сбор, обработка и хранение данных ГНСС-измерений на сервере ИСЗФ СО РАН

Пункты сети ИСЗФ СО РАН приема сигналов ГЛОНАСС/GPS расположены преимущественно на полигонах Института, где созданы хорошие условия для размещения соответствующей аппаратуры и организации непрерывного ГНСС-мониторинга ионосферы. Между тем, условия передачи данных на полигонах различны и не везде позволяют осуществлять оперативную передачу в центр обработки данных.

Наибольшую пропускную способность имеют каналы от пунктов ISTP и LIST. Данные с этих станций передаются на обрабатывающий сервер в исходном, неупакованном виде каждый час. Часть приемных пунктов (MOND, MKSM, USOL) на текущий момент не имеют стабильного канала передачи информации, эти измерения передаются курьером со средней периодичностью в несколько месяцев. Часть пунктов (UZUR, TORY, SARM, NORI) оборудована доступом в интернет, однако пропускная способность канала не позволяет передавать данные в исходном формате.

В ИСЗФ СО РАН организован специализированный сервер для сбора и обработки данных ГНСС-сети. В зависимости от качества канала связи данные передаются ежечасно либо ежесуточно. Система передачи включает в себя серверную и клиентскую части.

Клиентская часть разворачивается непосредственно на компьютере пункта приема ГНСС-сигнала и по расписанию осуществляет предварительную обработку исходных данных и их передачу в серверную часть. Степень предварительной обработки также различается в зависимости от пропускной способности: упаковка исходных данных (UZUR), преобразование исходных данных из формата JPS в Rinex и CompactRinex (TORY, NORI). Перевод в необходимый формат и подготовка к передаче осуществляется утилитой Cron по заданному расписанию. Непосредственная передача осуществляется несколькими путями в зависимости от стабильности канала передачи данных.

На полигоне «Исток» (NORI) доступ в интернет осуществляется через спутниковый канал связи. Стабильность данного канала зависит от множества факторов, в том числе, например, силы и направления ветра, влияющего на точность наводки приемо-передающей параболической антенны. Неустойчивость соединения делает нежелательной использование непосредственного копирования посредством удаленного доступа. Упакованные данные этой станции передаются в облачный сервис OwnCloud, развернутый в

ИСЗФ СО РАН. Сервис выполняет синхронизацию данных, используя стандартный порт 80 протокола HTTP и организуя докачку файлов в случае обрыва соединения.

Доступ в интернет на станции SARM осуществляется посредством модемного подключения к сотовой сети. Допустимый объем передачи в данном случае достаточно жестко фиксирован и позволяет предавать данные в максимально сжатом формате: заархивированный CompactRinex с данными групповых и фазовых измерений GPS на частотах L1 и L2. Данные передаются на вспомогательный сервер, откуда их по расписанию забирает программа на сервере сбора.

На станции в п. Торы (TORY) отсутствует ограничение на объем передачи, однако соединение также является нестабильным. В текущей реализации это не позволяет передавать данные в исходном формате, требуется предварительная обработка. После упаковки данные в формате CompactRinex передаются посредством утилиты защищенного копирования SCP (SecureCoPy) на вспомогательный сервер, откуда их по расписанию забирает программа на сервере сбора. Исходные данные в формате JPS пунктов NORI, SARM и TORY забираются курьером.

Станция UZUR имеет статический IP-адрес, что позволяет серверу сбора данных обращаться к размещенной там аппаратуре напрямую и копировать данные в исходном формате по расписанию. Для снижения объема передачи данные предварительно архивируются. Аналогично осуществляется получение данных со станций LIST и ISTP.

3.9.11. Результаты исследований магнитосферно-ионосферных взаимодействий по материалам экспериментальных наблюдений в обсерваториях Института

3.9.11.1. Ионосферный отклик на магнитные бури

На основе данных Иркутского ионозонда вертикального зондирования, полученных в 2003–2016 гг., проведен статистический анализ ионосферных откликов на геомагнитные бури. Анализ включал в себя выделение изолированных геомагнитных бурь (98 из 291) и отдельное рассмотрение откликов для различных сезонов (зима, лето, равноденствие) [6]. Показано, что усредненное для каждого сезона процентное возмущение максимума электронной концентрации (рис. 162) согласуется с общепринятой концепцией отклика среднеширотной ионосферы на геомагнитные бури (преимущественно положительный эффект зимой и преимущественно отрицательный эффект летом и в равноденствие). При этом разброс индивидуальных откликов для каждого сезона дает среднеквадратичное отклонение, которое превосходит усредненный отклик либо сравнимо с ним. Причиной таких разбросов могут являться ионосферные возмущения метеорологического происхождения (имеющие источники в нижней атмосфере), которые накладываются на возмущения, обусловленные собственно геомагнитной бурей. Проведенный анализ стимулирует исследование комплексного воздействия геомагнитных и атмосферных возмущений на ионосферу и распространение радиоволн.

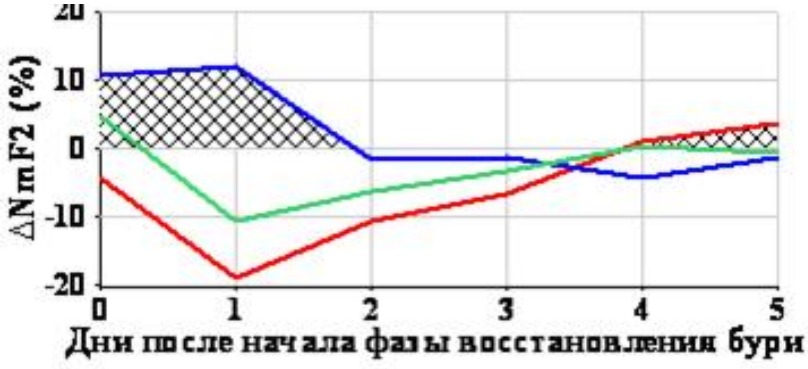


Рис. 162. Усредненное процентное возмущение максимума электронной концентрации ΔN_mF2 (%) для зимы (синяя кривая), лета (красная кривая) и равноденствия (зеленая кривая).

Публикации:

Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Statistics of daytime ionospheric disturbances in the recovery phase of magnetic storms from 2003–2016 Irkutsk ionosonde data // Proc. V International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety” (AIS-2016). 2016. P. 158–161. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf.

3.9.11.2. Разработка программного обеспечения комплекса радиотомографического исследования ионосферы по данным приема сигналов низкоорбитальных спутниковых систем, развертываемого в ИСЗФ

Метод томографического исследования ионосферы предполагает использование измерений параметров сигналов низкоорбитальных спутников и определенных на их основе вариаций величины ПЭС вдоль траектории пролета спутника. Томографические алгоритмы позволяют с использованием совокупности одномерных значений ПЭС вдоль траектории восстановить двумерное распределение электронной концентрации в координатах высота–дальность.

В 2016 г. был программно реализован метод алгебраической томографии в программной среде Python. Полученная программа позволяет анализировать особенности работы алгоритма по расхождениям в заданном и восстановленном распределениях электронной концентрации. С момента введения в работу аппаратуры радиотомографического комплекса (приемников сигналов низкоорбитальных спутников) и получения непосредственных измерений разработанные программы будут использованы для определения действительных профилей электронной концентрации.

3.9.11.3. Организация интерферометрических исследований ионосферы на базе приема сигналов геостационарных систем станциями сети спутниковых наблюдений ионосферы ИСЗФ. Сопоставление результатов наблюдений данного типа с исследованиями вариаций ПЭС, определяемыми по данным ГНСС-систем

Приемники сети ГНСС-станций ИСЗФ СО РАН вместе с сигналами основных группировок спутников систем ГЛОНАСС и GPS позволяют принимать сигналы SBAS. Спутники SBAS (Satellite Based Augmentation System, системы дифференциальной коррекции) позволяют повышать точность определения координат при решении навигационной задачи и на сегодняшний день являются неотъемлемой частью всех существующих глобальных навигационных систем. Космический сегмент SBAS составляют спутники, размещенные на геостационарных орбитах, что позволяет проводить исследования ионосферы без типичного недостатка спутникового радиозондирования — вклада собственного движения спутника в измеряемые величины.

Нашим приемникам доступны для приема одночастотные сигналы SBAS, что позволяет определять величину ПЭС, однако создает определенные трудности при работе с ней. Такой режим вычисления ПЭС имеет серьезные недостатки: неоднозначность определения фазы сигнала вносит ошибку на постоянную величину, групповые же измерения вносят сильные шумовые искажения. В совокупности со срывами сопровождения фазы, дающими резкие скачки величины ПЭС, это приводит к значительным зашумлениям и необходимости предварительной фильтрации рядов ПЭС.

Для работы с данными SABS был разработан метод фильтрации, основанный на выделении непрерывных участков, разделенных скачками и срывами, и последующем их объединении в длительный непрерывный ряд. Положительной стороной SBAS-измерений является возможность получения непрерывных рядов данных длительностью в несколько лет.

Анализ данных SBAS-ПЭС, полученных на станциях сети ИСЗФ, показал, что общая динамика ПЭС в течение 2015 г. соответствует общей годовой динамике ионосферы. Наибольшие значения ПЭС наблюдались в весенний период. Полученные распределения

ПЭС в системе время дня — день года показывают также хорошо различимый суточный ход, меняющийся в соответствии с вариациями времени прихода солнечного терминатора.

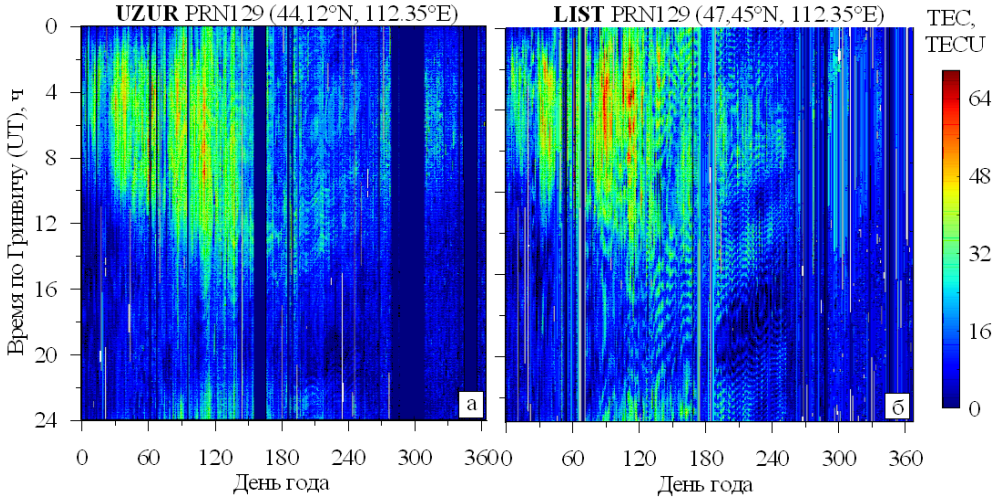


Рис. 163. Суточно-сезонные вариации ПЭС в 2015 г.

Особый интерес представляют вариации величины ПЭС, полученные на луче к спутнику PRN129 (рис. 163). Данные содержат выраженную периодическую структуру. Период данной структуры варьирует в зависимости от пункта наблюдения и меняется в течение года, имея тенденцию к уменьшению. Динамический спектр на рис. 163 показывает это более наглядно. Данный эффект хорошо выражен в данных станций п. Листвянка (LIST) и п. Узур (UZUR); в меньшей степени — станции в г. Усолье-Сибирское (ORDA) и почти совсем не выражен на станции в п. Сарма (SARM). Анализ данных был проведен также для станции в г. Улан-Удэ (ULAB) — аналогичная структура наблюдалась и в их данных. Близость расположения станций LIST, SARM и UZUR, как и удаленность станции ULAB, указывают на отсутствие выраженной зависимости наблюдаемости эффекта от географического положения. Дальнейший анализ показал, что имеющая место периодическая картина наиболее вероятно связана с особенностями приема-передачи спутника PRN129, однако детали этих особенностей еще предстоит установить.

Публикации:

Едемский И.К. Динамика полного электронного содержания по данным SBAS за 2015 г. // XII Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника: Материалы. Томск: ТМЛ-Пресс, 2016. С. 70–74.

3.9.11.4. Исследование зависимости амплитуды вариаций ПЭС от угла места на спутники GPS/ГЛОНАСС

Одним из основных признаков наличия возмущения в отфильтрованных вариациях ПЭС является превышение амплитуды вариаций над фоновым уровнем. Известно, что ПЭС, как величина, во многом определяемая длиной участка радиолуча «спутник-приемник», погруженного в ионосферу, зависит от угла места на спутник ГНСС. От такой зависимости значения ПЭС от угла места стремятся избавиться тем или иным способом, обычно с помощью так называемого преобразования ПЭС к вертикальному значению. Но остается вопрос зависимости от угла места амплитуды уже отфильтрованных вариаций ПЭС. В рамках решения поставленной задачи проведено исследование зависимости амплитуды вариаций ПЭС по данным иркутской станции GPS/ГЛОНАСС IRKJ за 2012 г. Полученные данные, приведенные на рис. 164, показали, что даже после приведения ПЭС к вертикальному значению амплитуда вариаций ПЭС увеличивается с уменьшением угла места, начиная с углов, меньших 30–40°.

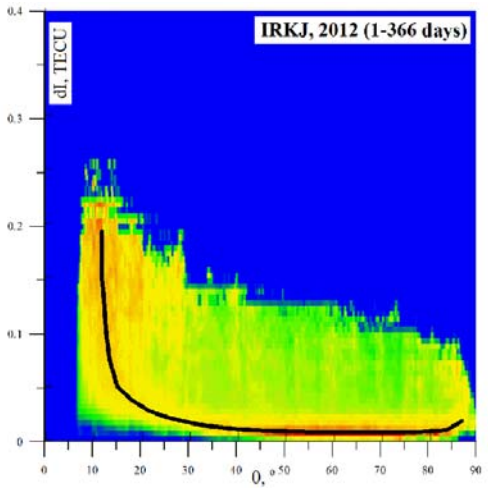


Рис. 164. Зависимость амплитуды вариаций ПЭС от угла места спутников

Публикации:

1. Безлер И.В., Ишин А.Б., Конецкая Е.В., Тинин М.В. Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн»: Труды. Томск, 4–9 июля 2016 г. Т. 1. С. 173–176. ISBN 978-5-86889-733-7.

2. Ишин А.Б., Воейков С.В. Проявление ионосферных эффектов работы двигателя корабля «Прогресс» в данных ГНСС // III Всероссийская научно-практическая конференция «Системы связи и радионавигации»: Тезисы докладов. Красноярск, 22–23 сентября 2016 г. С. 161–164. ISBN 9778-5-9905691-2-6.

3. Ишин А.Б., Тинин М.В., Безлер И.В., Конецкая Е.В. Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12/2, Ч. 1. Распространение радиоволн: тематический выпуск. С. 88–92.

3.9.11.5. Регистрация ионосферного отклика на включение двигателей космического корабля «Прогресс» по данным ГНСС

Проводилось детектирование ионосферных откликов на включение двигателей транспортно-грузовых кораблей «Прогресс». Обнаружение ионосферных эффектов проводилось по данным полного электронного содержания, полученным на приемных станциях ГЛОНАСС/GPS как постоянно действующих, так и специально развернутых на время экспериментов [7]. Отрицательные возмущения в полном электронном содержании маскируются фоновыми вариациями, однако могут быть уверено выделены. Возмущение регистрируется в течение нескольких минут после воздействия. Амплитуда возмущений достигает значений порядка 0.1 TECU. Поперечные размеры возмущений порядка 15 км.

Описание эксперимента

До 2013 г. активные эксперименты по обнаружению воздействий двигательной установки (ДУ) транспортно-грузовых кораблей (ТГК) «Прогресс» в ИСЗФ СО РАН проводились по данным постоянно действующих станций IRKJ и BADG, входящих в сеть IGS [8]. Во время экспериментов 2013 и 2014 г. использовались постоянно действующие станции сети SibNet ИСЗФ СО РАН: LIST (п. Листвянка), MOND (п. Монды), UZUR (п. Узур), ORDA (п. Усолье-Сибирское), TORY (п. Торы), а также временно развернутые станции BDRY (п. Бадары), ZMUR (п. Зун-Мурино), ZAKT (п. Закту́й).

На основе анализа разности фаз двух сигналов ГЛОНАСС/GPS на разных частотах рассчитывались вариации ПЭС $I(t)$ в ионосфере [9]. Для этого вида измерений ошибка определения не превышает 10^{14} м$^{-2}$, хотя начальное значение ПЭС остается неизвестным. Это позволяет детектировать неоднородности ионизации и волновые процессы в ионосфере в широком диапазоне значений амплитуд. Используется общепринятая единица измерения ПЭС TECU = 10^{16} м$^{-2}$.

Экспериментальные данные

На рис. 165 представлены геометрия измерений и отфильтрованные вариации ПЭС для экспериментов 4 мая 2006 (*а*, *б*) и 24 апреля 2011 г. (*в*, *г*). Фиолетовой линией показана траектория пролета ТГК. Треугольниками отмечены использовавшиеся в эксперименте станции GPS/ГЛОНАСС – IRKJ и BADG. Тонкими черными линиями со стрелками показаны траектории ионосферных точек: пунктирные соответствуют лучам на спутники GPS (номер спутника GPS начинается с буквы G), сплошные — лучам на спутники ГЛОНАСС (номер спутника ГЛОНАСС начинается с буквы R). Цветными кружками на траекториях показано положение ионосферных точек во время работы ДУ ТГК (10:38:30 UT). Цветом даны соответствующие этим лучам значения вариаций ПЭС (цветовая шкала приведена внизу). Сами траектории отображены для интервала времени ±30 минут от времени работы ДУ (10:06–11:06 UT). На рис. 165, *б* отображены отфильтрованные вариации ПЭС *dI*, соответствующие трем ионосферным точкам для лучей BADG–R18 (черная линия) и IRKJ-G23 (красная линия), которые на время пролета ТГК оказались к траектории пролета ближе остальных. Штриховой вертикальной линией дано время включения двигателя. Карты возмущений ПЭС (рис. 165, *а*, *в*) показаны для моментов времени, соответствующих минимумам вариаций ПЭС, которые были вызваны воздействием ДУ ТГК. Отклик на включение ДУ ТГК, представляющий собой уменьшение значений ПЭС, регистрируется при прохождении ионосферной точки через возмущенную область в течение ближайших 5–10 мин (рис. 165). При этом амплитуда наблюдаемых возмущений достигает значения порядка 0.1 TECU, что соразмерно с фоновыми вариациями и лишь незначительно их превышает (рис. 165, *б*, *г*).

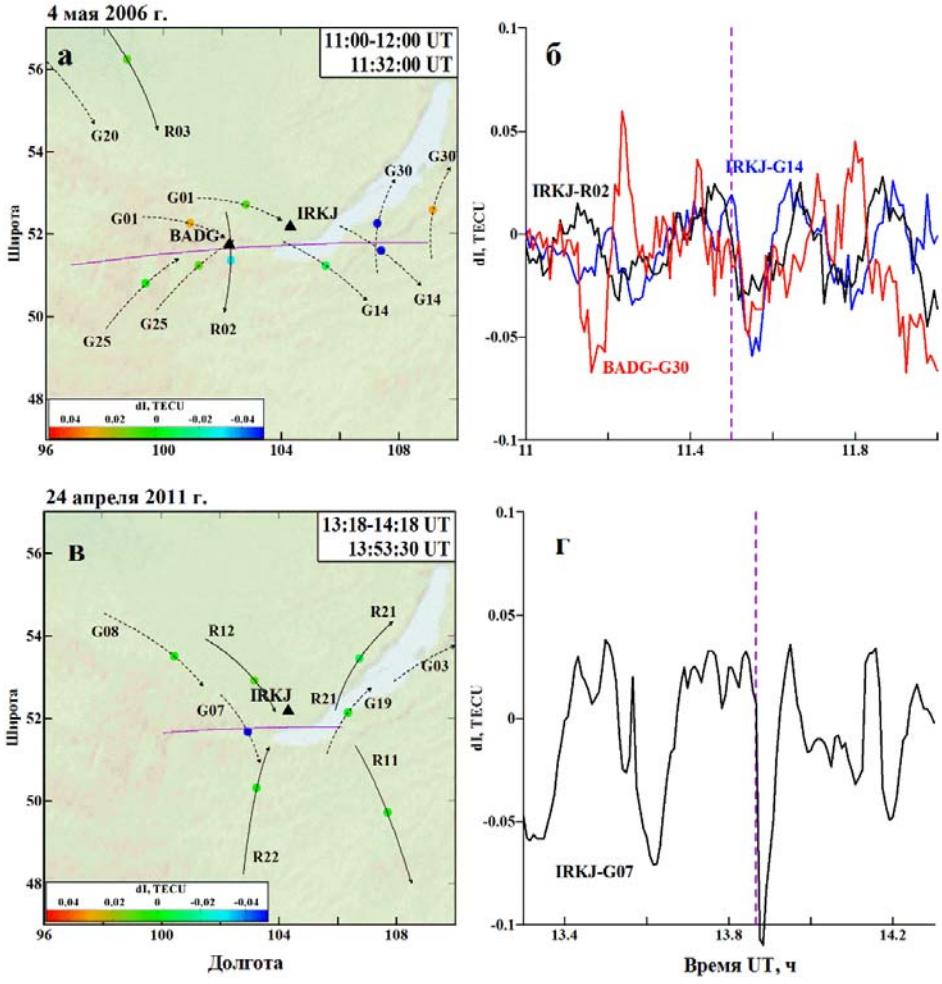


Рис. 165. Геометрия GPS/ГЛОНАСС измерений и соответствующие отфильтрованные вариации ПЭС во время экспериментов 4 мая 2006 г. (*а*, *б*) и 24 апреля 2011 г. (*в*, *г*)

Благодаря тому, что во время экспериментов 2013 и 2014 г. использовалось большее число станций, появилась возможность получить карты ионосферных точек и вариаций ПЭС для отдельных спутников (рис. 166). В процессе выполнения работы были проанализированы данные всех спутников ГЛОНАСС и GPS. Не всегда взаимное расположение ионосферных точек и области воздействия струи позволяло зарегистрировать ионосферные эффекты, однако в отдельных случаях это удалось. На рис. 166 представлен типичный случай прохождения ионосферной точки через возмущенную область, при этом на указанном луче наблюдается заметное уменьшение ПЭС (рис. 166, *б*).

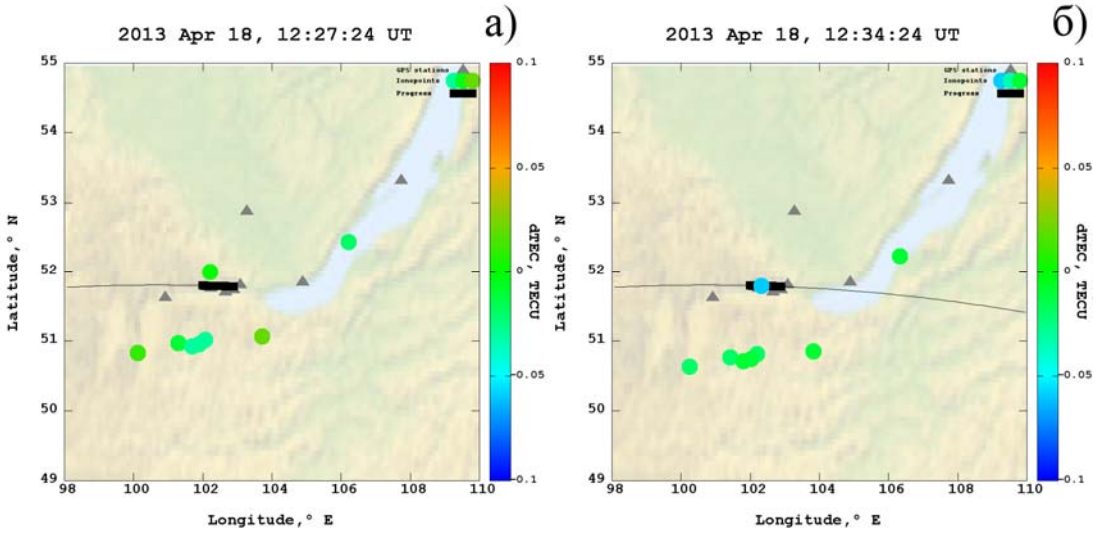


Рис. 166. Ионосферные точки для спутника PRN-07 GPS. Цветом указано значение вариаций ПЭС на данном луче спутник–приемник. Серые треугольники — станции ГНСС; черная линия — траектория ТГК «Прогресс»; утолщенный участок траектории ТГК «Прогресс» соответствует работающей ДУ

Ряды ПЭС и ряды вариаций ПЭС для соответствующих лучей спутник–приемник показаны на рис. 167. По данным всех восьми рядов для спутника GPS PRN-07 максимальное отрицательное возмущение регистрируется именно в момент совпадения положения ионосферной точки для станции ORDA и траектории ТГК «Прогресс». Указанное совпадение наблюдается спустя 7 мин после включения двигателя. При этом возмущение отчетливо выделяется, в том числе и на неотфильтрованых данных (рис. 167, *б*, *в*). Амплитуду возмущения можно оценить величиной порядка 0.6–0.8 TECU. Стоит отметить, что при прохождении ионосферных точек через область воздействия струи спустя 15–20 мин указанных возмущений не наблюдалось либо их амплитуда была ниже фоновых вариаций ПЭС.

Для оценки размера возмущенной области фиксировались координаты ионосферных точек на границе возмущения, определение которой, однако, довольно условно. В дальнейшем по дуге большого круга рассчитывалось расстояние между указанными ионосферными точками, и именно эту величину мы считали поперечным размером ионосферного возмущения. В соответствии с нашими данными возмущение 18 апреля 2013 г., регистрируемое в течение 4 мин по данным станции ORDA, имело поперечные размеры порядка 15 км.

В эксперименте 16 апреля 2014 г. ионосферные точка для спутника ГЛОНАСС-17 (рис. 168) станции ORDA пересекала область воздействия ДУ через 6 мин. Динамика вариаций ПЭС для ионосферных точек спутника системы ГЛОНАСС-17 позволяет обнаружить уменьшение ПЭС при прохождении ионосферной точкой области воздействия ДУ ТГК (рис. 169). Соответствующие вариации для станций ГЛОНАСС/GPS показаны на рис. 170. Для отрицательного возмущения ПЭС для луча ORDA-R17 была зарегистрирована амплитуда 0.16 TECU. Длительность регистрации возмущения не превышала 3 мин. Стоит сказать, что именно на станцию ORDA была направлена струя СКД.

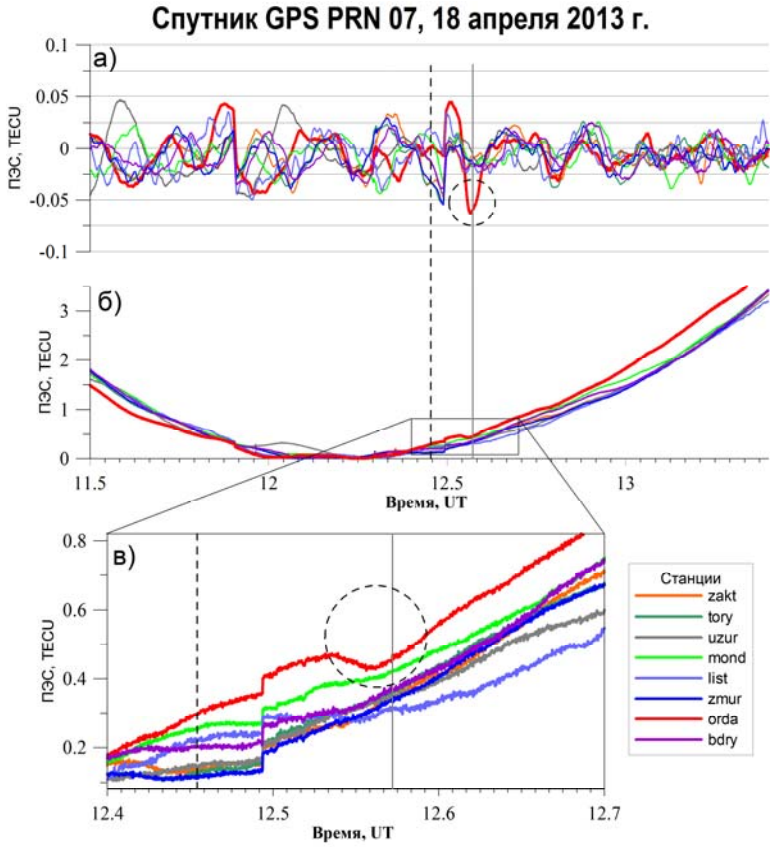


Рис. 167. Вариации ПЭС для спутника GPS PRN-07, отфильтрованные в диапазоне 0.5–10 мин (*а*) и без фильтрации (*б*, *в*) для разных станций. Вертикальная штриховая линия — момент включения ДУ. Вертикальная серая линия — момент пересечения ионосферной точкой луча ORDA–G07 траектории ТГК «Прогресс»

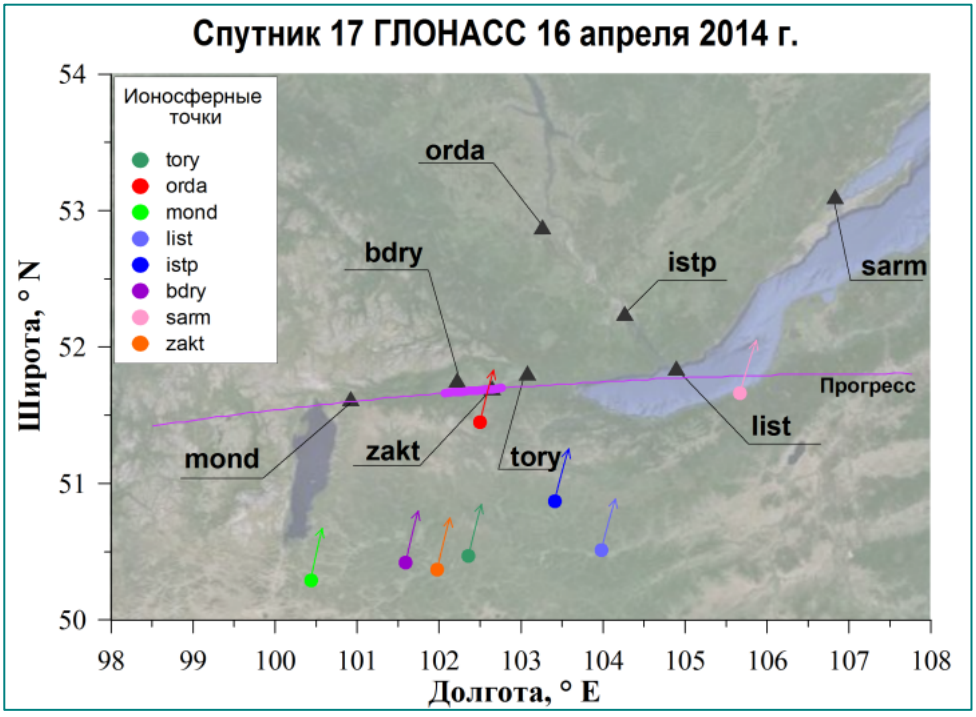


Рис. 168. Положение ионосферных точек (цветные точки) для спутника ГЛОНАСС-17 во время эксперимента 16 апреля 2014 г. Стрелками указана траектория движения ионосферной точки в течение 10 мин после включения ДУ ТГК. Черные треугольники — станции ГЛОНАСС/GPS

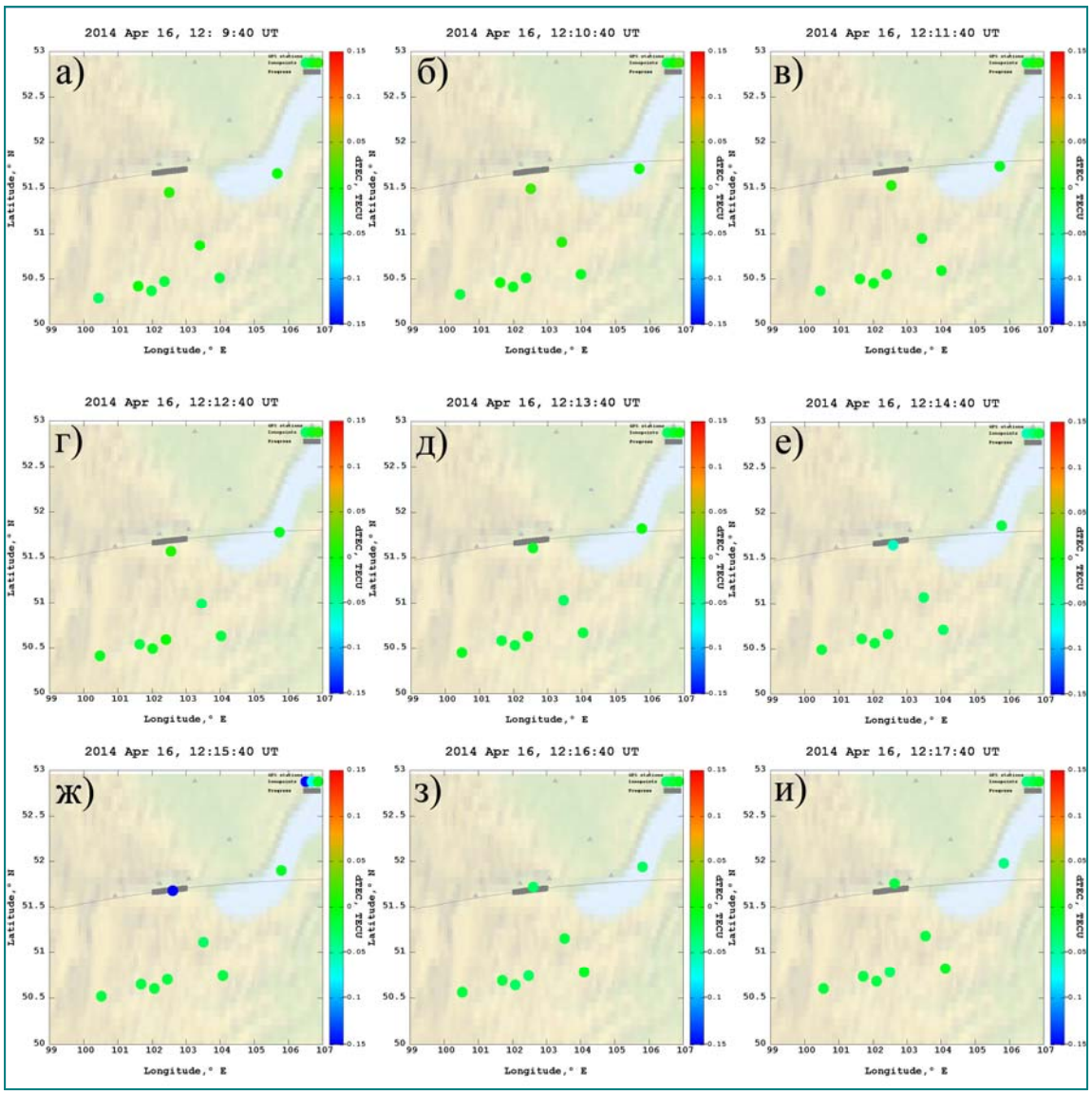


Рис. 169. Ионосферные точки для спутника ГЛОНАСС-17 в течение 8 мин после включения ДУ ТГК. Цветом точки указано значение вариаций ПЭС на соответствующем луче спутник–приемник. Серая линия — траектория ТГК «Прогресс», утолщенный участок траектории ТГК «Прогресс» соответствует работающей ДУ

Как видно из рис. 167, 168, 169, отклик ПЭС на работу ДУ ТГК удалось выявить на радиолучах, проходивших в непосредственной близости от области ионосферы, возмущенной работой ДУ, или пересекавших эту область. При этом соответствующие ионосферные точки перемещались преимущественно поперек траектории пролета ТГК.

Отклики ПЭС на работу ДУ ТГК представляют собой уменьшение значений ПЭС для вариаций длительностью 3–10 мин и амплитудой 0.03–0.6 TECU. Это позволяет сделать заключение, что работа ДУ вызывает уменьшение электронной концентрации.

Можно сделать следующие выводы. Анализ пространственно-временной картины вариаций ПЭС, наблюдавшейся во время активных космических экспериментов 2006–2014 гг., показал, что задача обнаружения отклика в ПЭС на работу двигателей транспортно-грузового корабля осложнена рядом факторов. Воздействие двигателей сильно локализовано в пространстве и имеет небольшую интенсивность. Интегральный характер измерений ПЭС затрудняет поиск таких возмущений. Возможный отклик ПЭС маскируется фоновыми возмущениями ионосферы различной интенсивности. Амплитуда возмущений ПЭС, регистрируемых спустя несколько минут составляет ~0.5–0.1 TECU, а поперечный размер — ~15 км.

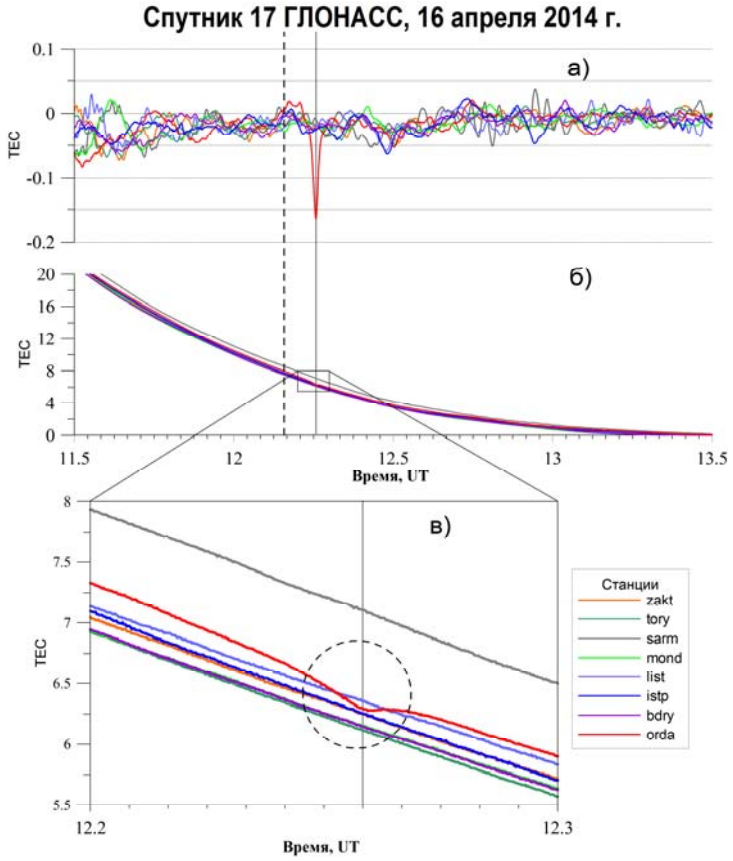


Рис. 170. Вариации ПЭС для спутника ГЛОНАСС-17, отфильтрованные в диапазоне 0.5–10 мин (*а*), и без фильтрации (*б*, *в*) для разных станций. Вертикальная штриховая линия — момент включения ДУ ТГК. Вертикальная серая линия — момент пересечения ионосферной точкой ORDA-R17 траектории ТГК с включенной ДУ

Публикации:

Ишин А.Б., Воейков С.В. Регистрация ионосферного отклика на включение двигателей космического корабля «Прогресс» по данным ГНСС // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: Тезисы докл. Томск, 30 июня — 3 июля 2016 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 144. http://symp.iao.ru/ru/aoo/22/i1.

3.9.11.6. Формирование вторичного источника низкочастотных инфразвуковых колебаний верхней атмосфере средних широт

При сейсмическом событии возмущенная земная поверхность активно обменивается импульсом с невозмущенной атмосферой. При этом лишь некоторые типы землетрясений способны вызывать ионосферные возмущения. Трудности с интерпретацией ионосферных возмущений при землетрясениях существуют до сих пор. Поэтому задача состоит в том, чтобы на примере наиболее известного и частого вида воздействия (сейсмического) понять: а) где формируется, как распространяется и трансформируется акустическая волна от поверхности Земли до ионосферы; б) как формируется ионосферный отклик на сейсмоакустическое воздействие.

Особенность реальной атмосферы заключается прежде всего в том, что реальный профиль температуры имеет несколько минимумов и максимумов в распределении температуры. В реальной атмосфере это приводит, во-первых, к канализации АГВ, во-вторых, при достаточно больших отрицательных градиентах температуры атмосфера может стать неустойчивой [10]. Эта зависимость является биквадратным уравнением относительно частоты.

В последние годы особое внимание уделяется.данным, получаемым со спутниковых

систем. Примером такой системы является американский спутник АУРА, где основой сбора информации является оборудование MLS (Microwave Limb Sounder). В нашем случае для сбора информации выбраны координаты пункта, близкого к расположению инфразвуковой станции (52º N, 103º E). Эти данные по профилю температуры, полученные со спутника АУРА, являются основой расчета высотных градиентов температуры до высоты около 85 км. Периоды зимнего времени года (январь) считаются оптимальными для наблюдения инфразвуковых сигналов, поскольку в это время наблюдениям инфразвука сопутствует минимум атмосферных помех. Кроме того, январь 2015 г. был сейсмически активным, поскольку в его первую половину произошло более 10 землетрясений энергетических классов 9–12 (4–5 балов по шкале Рихтера).

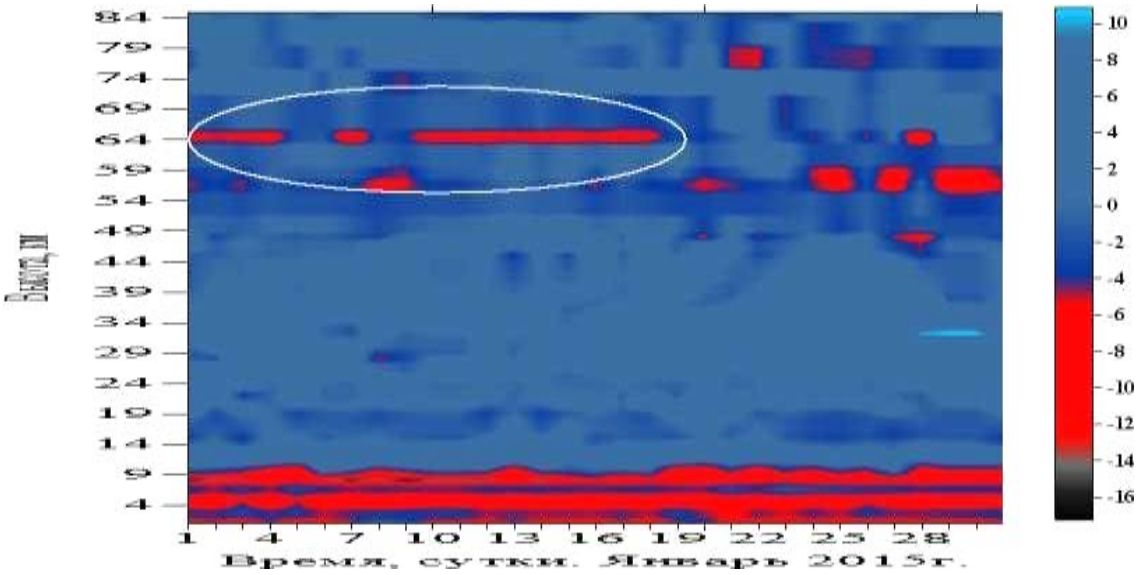


Рис. 171. Высотно-временное распределение градиентов температуры в январе 2015 г. ГФО ИСЗФ СО РАН (сейсмоактивный период 2015 г. показан овалом)

Таким образом, для сейсмоактивного периода получен высотно-временной ход градиента температуры для января 2015 г. (рис. 171). Овалом выделена область атмосферы на высоте около 65 км, где возможно возбуждение низкочастотных АГВ.

Известно, что сейсмические процессы — землетрясения — часто сопровождают излучение в инфразвуковом диапазоне частот. Впервые это со всей очевидностью проявилось при сильнейшем землетрясении на Аляске в 1964 г. Расположение инфразвуковой станции в Бурятии плотно прилегает к Байкальской рифтовой зоне, которая также является сейсмически весьма активной. Достаточно ярко эта активность проявилась в январе 2015 г., когда по данным сейсмической станции «Иркутск» в районе Северного Байкала произошло более 10 землетрясений умеренной силы (интенсивность 3–5 балов). Акустическая интенсивность таких сигналов на уровне земли обычно слаба, а их частоты лежат в пределах нескольких герц, что в присутствии атмосферной турбулентности существенно затрудняет их обнаружение.

Однако при интенсивности землетрясений выше четырех баллов уже обнаруживается инфразвуковое излучение, которое, уходя вверх в атмосферу, может достигать верхних слоев атмосферы, перенося с собой момент количества движения(высоты ~65 км, где сосредоточены большие отрицательные градиенты температур). Для анализа реакции атмосферы на такие сейсмические события подобраны реальные данные наблюдений низкочастотного инфразвука на станции ГФО ИСЗФ СО РАН (Бурятия). Они сопряжены по времени с данными спутника АУРА и расчетами высотных градиентов.

Для анализа реакции слоя атмосферы с резкими отрицательными градиентами температуры использовались такие параметры АГВ, как амплитуда и период. На первой стадии сравнения с сейсмической активностью (по данным сейсмостанции «Иркутск») были

взяты амплитудные значения инфразвука, однако, по-видимому, из-за присутствия случайных колебаний, связанных с атмосферной турбулентностью, корреляция с сейсмической активностью нам показалась низкой.

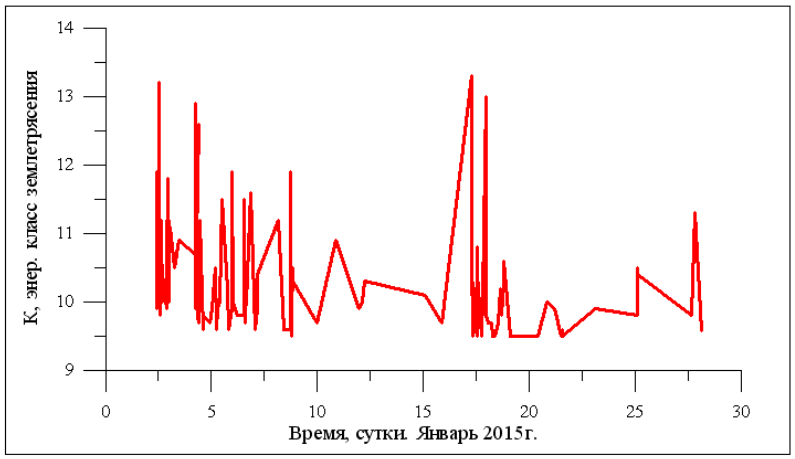


Рис. 172. Энергетический класс землетрясений на севере Байкала (январь 2015 г.).

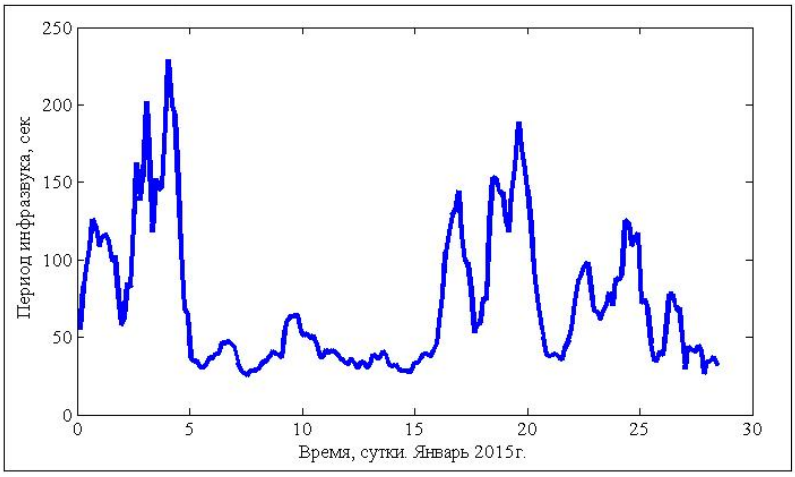


Рис. 173. Вариации периода НЧ-инфразвука на обсерватории ИСЗФ. Январь 2015 г.

На втором этапе сравнения с сейсмическими данными были привлечены вариации периодов инфразвукового излучения (рис. 173). Видно, что сравнение рис. 172 и 173 обнаруживает более тесную связь сейсмических процессов с инфразвуком на этом интервале времени. По оценке углов места инфразвук приходит сверху в растворе углов до 14° от вертикали, что соответствует положению источника на большой высоте. Однако следует заметить, что это пока начальный этап работы и далее следует привлекать для анализа расширенную статистику. Не совсем понятна роль сейсмических процессов после 4 января 2015 г. и понижение высотных градиентов температуры. Тем не менее, можно полагать, что инфразвуковые НЧ-сигналы, наблюдаемые в сейсмоактивный период в январе 2015 г. на станции ИСЗФ СО РАН, возможно, связаны с реакцией определенных слоев атмосферы на сейсмическое воздействие от землетрясений.

Выводы:

1. Была проанализирована возможность возбуждения инфразвуковых НЧ-колебаний на высоте атмосферы, где возникают большие отрицательные градиенты температуры

2. Обнаружена тесная связь сейсмической активности (значения энергетического класса землетрясений, произошедших на Северном Байкале в январе 2015 г.) и периодов низкочастотного инфразвука в Байкальском регионе.

Публикации:

1. Сорокин А.Г. Инфразвуковое излучение Челябинского метеороида // Изв. РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80, № 1. С. 102–106.

2. Сорокин А.Г. О возбуждении вторичного источника акустико-гравитационных волн на ионосферных высотах // XXV Всероссийская открытая конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований: Труды. Томск, 3–9 июля 2016 г. http://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/ru/abstr_8268.pdf.

3.9.11.7. Исследование электромагнитного отклика в магнитном поле Земли на работу двигателей КА (эксперимент «Радар–Прогресс»)

В рамках космического эксперимента «Радар–Прогресс» на магнитно-измерительных комплексах, расположенных в обсерваториях Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, и магнитно-теллурической аппаратуре мобильного комплекса проведено 33 сеанса регистрации колебаний магнитного поля Земли (МПЗ) во время включений бортовых двигателей космических грузовых кораблей серии «Прогресс» на околоземной орбите. Предполагалось, что работа двигателя может стимулировать возмущения геомагнитного поля в силовых трубках, пересекаемых космическим кораблем. При анализе экспериментального материала учитывались факторы космической погоды: параметры солнечного ветра, суммарный за сутки K_p-индекс возмущенности геомагнитного поля в средних широтах, *AE*-индекс возмущенности магнитного поля в авроральной зоне, глобальная магнитная возмущенность.

Была сформулирована задача на исследование вариаций МПЗ в рамках проведения активного космического эксперимента (КЭ) «Радар–Прогресс» [11, 12]. Постановщиком КЭ выступило Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш). Ракетно-космическая корпорация (РКК) «Энергия» имени С.П. Королева — организация, разработавшая программно-методическое обеспечение КЭ и ответственная за техническую реализацию КЭ. В сеансах КЭ задействованы наземный пространственно-разнесенный комплекс радиотехнических, оптико-электронных, магнитометрических и навигационных средств наблюдений и измерений ИСЗФ СО РАН и транспортные грузовые корабли (ТГК) серии «Прогресс» в фазе автономного полета после выполнения основной миссии по доставке грузов на МКС.

Во время пролета ТГК в зоне ответственности Иркутского радара некогерентного рассеяния в предварительно рассчитанное время на 8-10 с включался бортовой сближающе-корректирующий двигатель (СКД), потребляющий 1 кг топлива в секунду. Высоэнергичные выхлопные газы могли стимулировать развитие в магнито-ионосферной плазме электромагнитные возмущения, которые могли быть зарегистрированы на поверхности Земли магнитометрической аппаратурой.

В связи с таким предположением в эти периоды в обсерваториях ИСЗФ СО РАН и в точке проекции силовой трубки геомагнитного поля на поверхность Земли, в которой по расчетам находился ТГК «Прогресс», работали индукционные магнитометры и проводился мониторинг вариаций геомагнитного поля Земли в различных диапазонах периодов.

Анализ экспериментального материала осуществлялся по следующей схеме. Точкой отсчета являлось включение ДУ ТГК «Прогресс». По данным индукционных магнитометров с помощью спектрально-временного анализа (программа СВАН) строился динамический спектр колебаний во время работы двигателей, а также за 1 час до и после включения. Схема анализа экспериментального материала (рис. 174) показана на примере события 18 июня 2013 г. (*AE* ~150 нТл, $K_p = 1$; слабовозмущенный период).

В рассматриваемом случае на фоне слабовозмущенного геомагнитного поля появляются пульсации в диапазоне периодов ~70 с, которые повторяются через 15 мин.

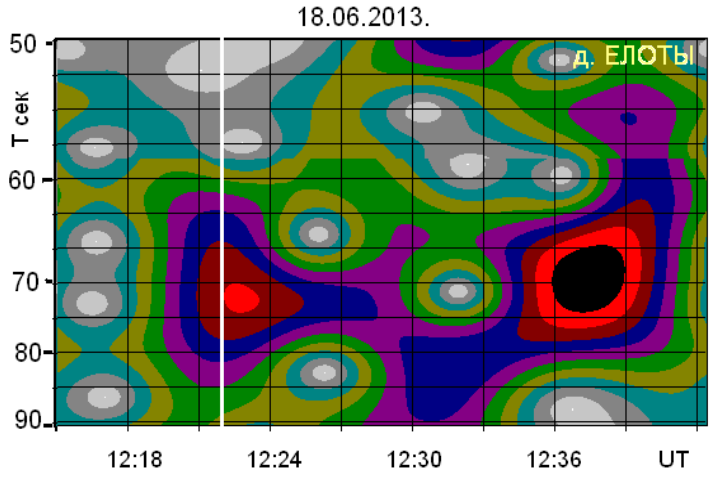


Рис. 174. Динамический спектр геомагнитных пульсаций, зарегистрированных 18 июня 2013 г. Компонента $H_{с–ю}$. Вертикальной линией отмечен момент включения двигателей

Для общего анализа всех зарегистрированных событий мы совместили моменты начала работы СКД. Ниже на рис. 175 показаны данные при совмещении времени начала работы двигателей.

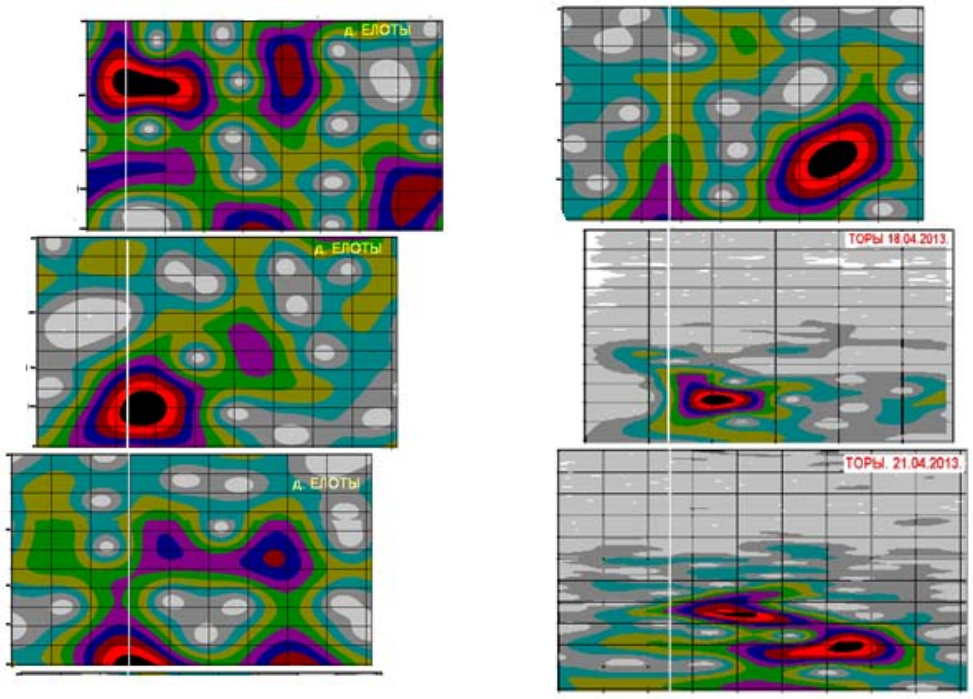


Рис. 175. Анализ экспериментальных данных при совмещении моментов начала работы СКД. Проводятся спектры колебаний электромагнитного поля Земли до и после включения двигателей. Вертикальная белая линия — начало работы двигателей ТГК «Прогресс»

Характерным для всех рассмотренных случаев является возбуждение геомагнитных вариаций в диапазоне периодов 25–160 с. В некоторых случаях через 6–15 мин наблюдается повторение сигнала. Необходимо еще раз подчеркнуть, что практически все случаи происходили на очень спокойном и спокойном геомагнитном фоне как в средних, так и в высоких широтах, что исключает возможность маскирования наблюдаемого эффекта возмущениями от других источников. Из 33 случаев в 18 наблюдались геомагнитные вариации в различных диапазонах периодов [13].

Общий итог распределения сеансов регистрации относительно возмущений в авроральной зоне:

Спокойный фон — 10 случаев.

В начале возмущения — 6.

В конце возмущения — 7.

Во время возмущения — 7.

Между возмущениями — 3.

Необходимо отметить следующее. Если рассматриваемое событие происходит в период длительного спокойного состояния магнитного поля Земли, силовые трубки геомагнитного поля не имеют достаточной концентрации частиц, необходимых для развития неустойчивости в космической плазме. В этом случае ожидать возбуждения геомагнитных вариаций в периоды работы двигателей ТГК «Прогресс» маловероятно, так как нет плазмы, способствующей распространению возмущения в магнитосферном резонаторе и его возбуждению. В период сильных магнитных возмущений в авроральной зоне в магнитосфере присутствует широкий спектр геомагнитных возмущений, не позволяющих провести регистрацию «полезных» сигналов. И, наконец, другая ситуация, когда эксперимент проводится после возмущений на спокойном фоне. Силовые трубки геомагнитного поля Земли заполнены частицами различных энергий, что позволяет ожидать положительной реакции магнитосферы на работу двигателей.

При подведении итогов проведенных исследований необходимо отметить, что численность экспериментов явно недостаточна для уверенных выводов об обнаруженных закономерностях, тем более, что анализ литературных источников показал отсутствие исследований при такой постановке задачи. При планировании будущих экспериментов в этом направлении необходимо, по нашему мнению, планировать размещение наблюдательных средств как можно точнее в расчетном месте проекции конца силовой трубки на поверхность Земли и в незначительном удалении от этой точки размещать аналогичный комплекс аппаратуры, так как эффект может быть весьма локальным.

Публикации:

Липко Ю.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А., Хахинов В.В. Эффекты в магнитном поле Земли от работы двигателей космического корабля // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 33–40.

Список использованных источников:

1. Алешков В.М., Евстифеев С.Е., Молодых С.И., Нечаев С.А. Система регистрации параметров атмосферного электричества и результаты ее тестирования // Физика Солнца и околоземного космического пространства. Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2013. С. 220–223.

2. Ерущенков А.И., Пономарев Е.А., Турчанинов И.П. Прибор для регистрации инфраакустических и гравитационных атмосферных волн // Иссл. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1974. Вып. 34.

3. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В. Спектральные измерения собственного излучения ночной атмосферы с помощью спектрографа Shamrock SR-303i // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 192–197.

4. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В., Сыренова Т.Е., Алешков В.М., Черепанов В.Б. Комплекс оптических инструментов на высокоширотной станции «Исток» ИСЗФ СО РАН // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Международного симпозиума. Электронный ресурс. 2016. С. 162–167.

5. Нечаев С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. Иркутск, 2006. 140 с.

6. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Statistics of daytime ionospheric disturbances in the recovery phase of magnetic storms from 2003–2016 Irkutsk ionosonde data //

Proc. V International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety” (AIS-2016). 2016. P. 158–161. http://ais2016.ru/wp-content/uploads/2016/07/ais2016.pdf

7. Ишин А.Б., Воейков С.В. Проявление ионосферных эффектов работы двигателя корабля «Прогресс» в данных ГНСС // III Всероссийская научно-практическая конференция «Системы связи и радионавигации»: Тезисы докл. Красноярск, 22–23 сентября 2016 г. С. 161–164. ISBN 9778-5-9905691-2-6.

8. Dow J.M., Neilan R. E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s0019000803003.

9. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006.

10. Пономарев Е.А., Ерущенков А.И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (обзор). Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12.

11. Твердохлебова Е.М., Корсун А.Г., Хахинов В.В., Лебедев В.П., Лалетина Е.А., Манжелей А.И., Габдуллин Ф.Ф. Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 1(50). С. 51–60.

12. Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.A., Shpynev B.G. Active space experiments with the use of the transport spacecraft “Progress” and Irkutsk IS Radar // Progress in Electromagnetics Research Symposium. 2009. P.223-227.

13. Липко Ю.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А., Хахинов В.В. Эффекты в магнитном поле Земли от работы двигателей космического корабля // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 33–40.

4. Развитие методов и аппаратуры исследований в области астрофизики и геофизики

Научные исследования выполнялись в отделах физики Солнца и радиоастрофизики.

Приоритетное направление II.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.

1. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.1 «Фундаментальные проблемы процессов космической погоды, включая процессы на Солнце, в межпланетной среде, магнитосфере и атмосфере Земли. Контроль и экология околоземного космического пространства» (координатор — академик Г.А. Жеребцов).

1.1. Проект II.16.3.3 «Методы и инструменты астрофизического эксперимента». Рег. номер 01201281648. Руководители проекта — д.ф.-м.н. М.Л. Демидов, к.ф.-м.н. С.В. Лесовой.

2. Программа Президиума РАН № 7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (координаторы — академик Л.М. Зеленый, чл.-корр. Б.М. Шустов).

2.1 Проект «Фундаментальные основы мониторинга и контроля околоземного космического пространства в оптическом диапазоне». Руководитель проекта — чл.-корр. РАН В.М. Григорьев.

4.1. Методы и инструменты астрофизического эксперимента

4.1.1. Разработка и создание перспективных проблемно-ориентированных телескопов и приборов

4.1.1.1. Модернизация хромосферного телескопа. Новый свет: сборка и юстировка оптики, проведение наблюдений

4.1.1.1.1. Наблюдение хромосферы в линии Hα

В Сибирском институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (СибИЗМИР) в 1980 г. был разработан и изготовлен первый отечественный телескоп с фильтром на линию Hα для наблюдений хромосферы полного диска Солнца с пространственным разрешением около одной угловой секунды. Основные характеристики хромосферного телескопа и фильтра:

• Диаметр главного объектива — 180 мм.
• Эквивалентное фокусное расстояние — 5432 мм.
• Невиньетированное поле зрения — 34 угл. мин.
• ИПФ (интерференционно-поляризационный фильтр) производства фирмы Bernhard Halle Nachfl. GmbH.
• Длина волны полосы пропускания фильтра — 6563 Å.
• Полуширина полосы — 1 Å или 0.5 Å.
• Смещение полосы в пределах ±1 Å.

Важным аспектом экспериментального изучения геоэффективных явлений в солнечной атмосфере является анализ состояния хромосферы в предшествующие им моменты времени. Как известно, вспышечные и эруптивные явления происходят и развиваются на различных временных и пространственных масштабах, что определяет широкий круг наблюдательных задач и требований к соответствующим приборам. Требования в первую очередь касаются рабочей длины волны, поля зрения и пространственного разрешения. Особую роль в изучении хромосферы играет линия Hα: впервые хромосфера и была определена как то, что видно в этой линии.

В ИСЗФ СО РАН систематические наблюдения хромосферы были начаты в 1981 г. Съемка изображения диска Солнца диаметром 50 мм велась на 80-миллиметровую фотопленку. С развитием технологий производства фотодатчиков с 2000 г. фотосъемка ведется на цифровые видеокамеры. С 2000 г. использовалась видеокамера производства Princeton Instruments с размером ПЗС-фотодатчика (прибор с зарядовой связью) 50×50 мм и разрешением 2048×2048. Поскольку камера относилась к первым поколениям подобных устройств, время считывания одного кадра было весьма большим — около 1 мин. Позже были проведены пробные эксперименты по использованию более быстрой камеры Konica Minolta DiMAGE A2 (3264×2448), которая, однако, позволяла проводить съемку только некоторой области солнечного диска — активных областей. Для получения полного диска был установлен коммерческий объектив, который строил уменьшенное до 18 мм изображение Солнца. Следующий этап заключался в создании оптической системы — перестраивающего объектива — для эффективного использования видеокамеры нового поколения Hamamatsu C9300-124 с детектором 36×24 мм (4000×2672 пикселей).

В хромосферном телескопе качество изображения определяется перестраивающим объективом, возможностями видеокамеры, а также спектральными приборами – ИПФ и фильтром предварительной монохроматизации. Несмотря на относительно чистую байкальскую атмосферу, оптика телескопа за 35-летнюю круглогодичную эксплуатацию загрязнилась пылью ближайших новостроек, сажей лесных пожаров. Появились темные точки в поле зрения и каплеобразные «расклейки» на краю поля. Таким образом, в ходе второго этапа работ по модернизации хромосферного телескопа потребовалось не только

рассчитать и изготовить новый перестраивающий объектив для получения качественного изображения полного диска Солнца, но и выполнить профилактические работы, а также полную юстировку всей оптики телескопа.

4.1.1.1.2. Изготовление перестраивающего объектива

Силами ИСЗФ СО РАН был изготовлен новый четырехлинзовый объектив для хромосферного телескопа. Объектив перестраивает изображение солнечного диска диаметром 18 мм на фотодатчике размером 24×36 мм видеокамеры Hamamatsu C9300-124, а также выполняет коррекцию аберраций предшествующей оптики. Первичное изображение Солнца диаметром 20 мм строится телеобъективом и линзой поля примерно в середине апертуры ИПФ. Новый объектив был рассчитан в виде системы из двух компонентов, каждый из которых состоит из двух линз (крон, флинт), с использованием только двух номиналов радиусов кривизны. Каждый компонент перестраивающего объектива собран на иммерсии с показателем преломления n_d=1.578.

Качество изготовленной оптической системы контролировалось с помощью интерференционных методов. Для этого использовался неравноплечий интерферометр в автоколлимационной схеме в плоскости наилучшего изображения (рис. 176). На рис. 177 показаны расчетная волновая разность хода лучей в 4-линзовом перестраивающем объективе для точки на оси (рис. 177, *а*) и интерферограмма волнового фронта в двойном ходе лучей через объектив (рис. 177, *б*). Волновые аберрации перестраивающего объектива близки расчетным и находятся в пределах 0.1λ.

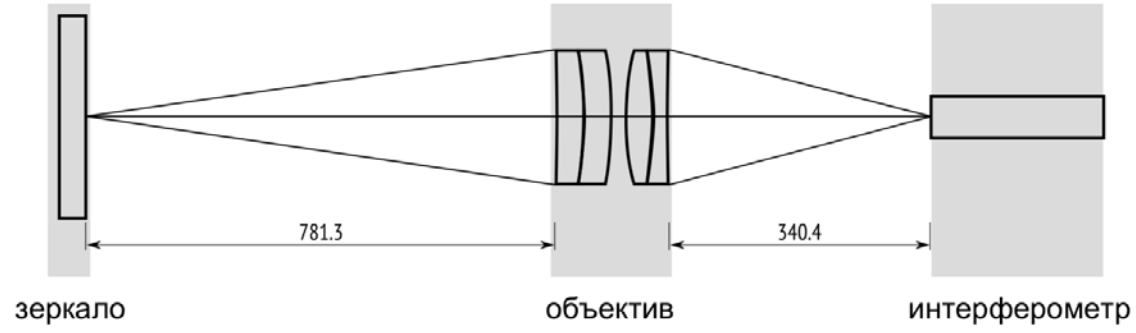
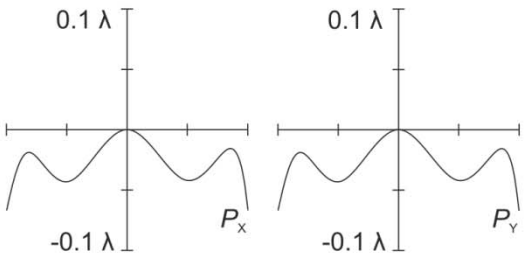
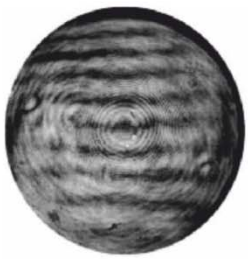


Рис. 176. Схема контроля в плоскости наилучшего изображения



(а) Расчетные значения: P, P_y – радиусы входного зрачка в меридиональной и сагиттальной плоскостях



(б) Интерферограмма волнового фронта, полученная в двойном ходе лучей для λ=6328 Å

Рис. 177. Волновой фронт объектива: расчетные и измеренные значения

4.1.1.1.3. Сборка и юстировка телеобъектива в штатной оправе

Штатная оправа телеобъектива — труба длиной около 400 мм (рис. 178). В ней имеется регулировка наклона отрицательной линзы на шаровой опоре заднего фланца трубы и

продольного перемещения этой линзы относительно положительной, закрепленной неподвижно на переднем фланце трубы. Юстировка линз перпендикулярно оптической оси осуществляется центрированием оправ линз в трубе телеобъектива при сборке. Линзы телеобъектива устанавливаются в свои оправы (рис. 179, сноски 1, 4) на трех боковых прокладках, расположенных под углом 120°. В эти же оправы на время юстировки объектива крепятся диафрагмы (рис. 179, сноски 7, 9) с отверстиями 1–2 мм. По этим отверстиям центрируется луч лазера, установленного вместе с экраном (рис. 179, сноска 5) со стороны положительной линзы на расстоянии ~1 м. Луч трассирует положение геометрической оси трубы телеобъектива. Положительная линза выставляется перпендикулярно оптической оси наклоном и поперечным смещением всей трубы механизмами оптической скамьи. Контроль ведется на экране ЭВМ по бликам, отраженным от поверхностей линзы. Блик от ее передней выпуклой поверхности расплывчатый, блик от задней вогнутой — сфокусированный (рис. 180, *а*). При сближении бликов наблюдается интерференционная кольцевая картинка, центр которой наклоном линзы (трубы) приводится к отверстию в экране (рис. 180, *б*).

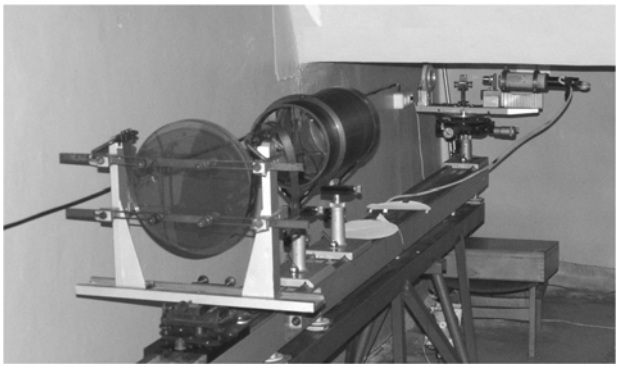


Рис. 178. Установка с плоским эталоном и интерферометром для контроля волнового фронта телеобъектива

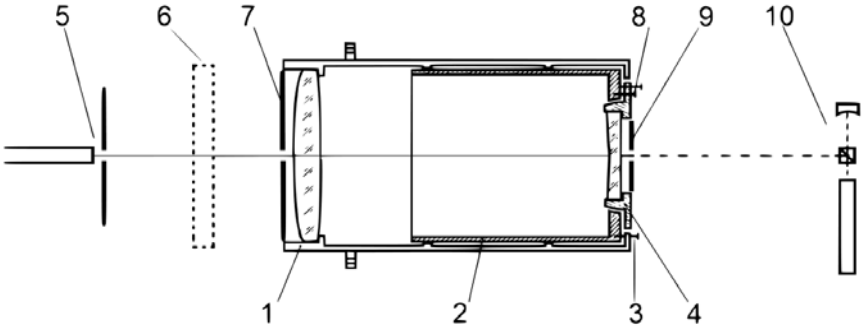
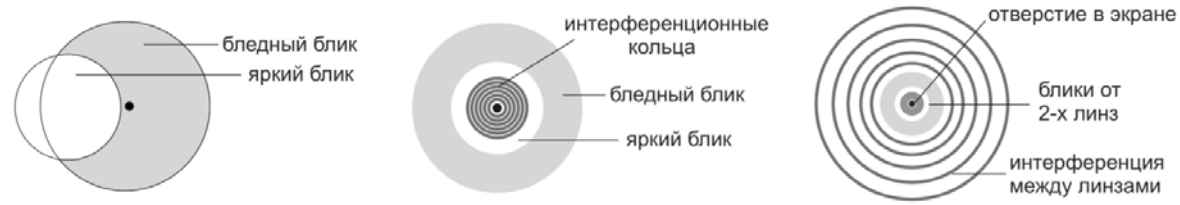


Рис. 179. Юстировка и контроль телеобъектива в оправе



(а) Блики от положительной линзы разведены

(б) Блики от положительной линзы совпадают

(в) Блики от четырех поверхностей двух линз совпадают

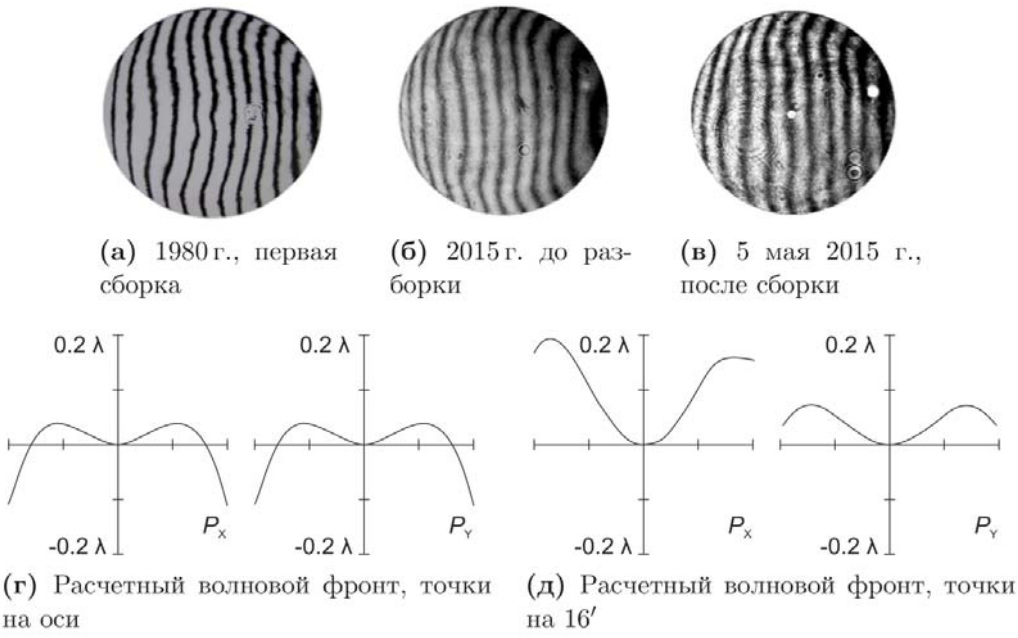
Рис. 180. Юстировка телеобъектива: схема появления интерференции при совмещении бликов

После юстировки по бликам от положительной линзы труба телеобъектива жестко закрепляется на оптической скамье. Блики от отрицательной линзы регулировками наклона оправы на шаровой опоре также приводятся к центральному отверстию экрана до появления интерференционной картины внутри этой линзы и между линзами. Когда блики от линз расположены близко к отверстию на экране, их точное наведение на центр отверстия выполняется наклоном линз, а смещение и центрирование интерференционных картин — параллельным смещением линз. Если центры трех картин не удается совместить изменением наклона отрицательной линзы, необходимо сместить линзу в оправе в направлении совмещения картин путем замены прокладок. На экране (рис. 180, *в*) наблюдаются три системы интерференционных колец Ньютона — две от линз и одна, более широкая, от поверхностей воздушного промежутка, «дышащая» от вибраций в помещении и турбуленции воздуха в нем. При требуемых допусках на центрирование объектива и расстоянии от линз до экрана 2 м допустимые расхождения центров картин должны составлять не более 0.5 мм.

4.1.1.1.4. Исследование волнового фронта телеобъектива

В фокусе телеобъектива устанавливается неравноплечий интерферометр (рис. 176, 178, 179, сноска 10), который центрируется по отверстиям диафрагм на оправах линз телеобъектива, а со стороны положительной линзы используется плоское эталонное зеркало (рис. 179, сноска 6) для контроля волнового фронта в автоколлимационной схеме. Интерферограммы волнового фронта в двойном ходе лучей получены для точки на оси телеобъектива с расстоянием между линзами 345.5 мм. При таком расстоянии система телеобъектив — линза поля строит промежуточное изображение Солнца в середине апертуры оптической стопы ИПФ. На рис. 181 приведены интерферограммы до разборки (рисунок 4.1.6б) и после чистки и сборки (рис. 181, *б*). Для сравнения показана интерферограмма волнового фронта объектива после первой сборки в 1980 г. (рис. 181, *а*). Расчетные профили волнового фронта для точек на оси показаны на рис. 181, *г* и на расстоянии 16' — на рис. 181, *д*.

За 35 лет эксплуатации телескопа юстировка и волновой фронт телеобъектива практически не изменились. Вновь отъюстированный объектив показывает волновой фронт не хуже, чем до разборки, и даже ближе к расчетному значению. Различия в интерферограммах могут быть вызваны воздушными потоками в помещении и температурными градиентами на линзах, возникающими, несмотря на продувку вентилятором зоны контроля.



(а) 1980 г., первая сборка **(б)** 2015 г. до разборки **(в)** 5 мая 2015 г., после сборки

(г) Расчетный волновой фронт, точки на оси **(д)** Расчетный волновой фронт, точки на 16′

Рис. 181. Интерферограммы волнового фронта телеобъектива в разные годы

4.1.1.1.5. Юстировка оптической системы хромосферного телескопа

На оптическую скамью устанавливается без оптики труба телескопа (рис. 182), собранная из блоков: фланца телеобъектива — 1, средника — 2, фильтра — 3 и перестраивающего объектива — 4 с камерой.

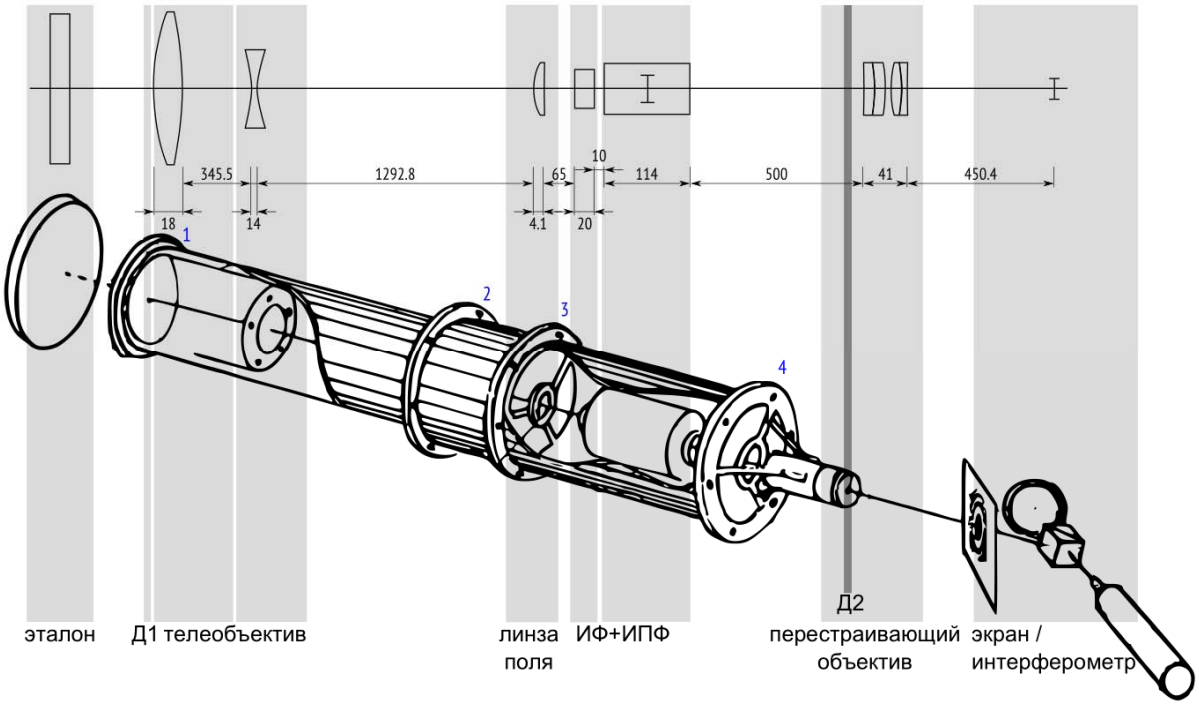


Рис. 182. Схема юстировки и контроля хромосферного телескопа. Расстояния между оптическими элементами даны в миллиметрах.

Со стороны перестраивающего объектива устанавливают неравноплечий интерферометр с экраном. В передний фланец телескопа и монтировку оправы перестраивающего объектива устанавливаются диафрагмы Д1, Д2 с центральным отверстием 1–2 мм. Эти отверстия являются базисными для трассировки будущей оптической оси телескопа и установки оптики телеобъектива, линзы поля, ИПФ, перестраивающего объектива и цифровой видеокамеры. Светоделительный кубик интерферометра на время юстировки заменяется зеркальной призмой, чтобы избавиться от паразитных бликов. Подвижками интерферометра луч лазера от призмы через отверстие в экране направляется в телескоп и совмещается с осью телескопа по базисным отверстиям диафрагм. Установка и юстировка оптических элементов проводится в последовательности их расположения в оптической схеме, начиная с телеобъектива.

Телеобъектив. Собранный и отъюстированный в своей оправе телеобъектив закрепляется на передний фланец телескопа. Наклоном всей оправы интерференционная картина бликов, отраженных от поверхностей линз телеобъектива, приводится на центр экрана интерферометра.

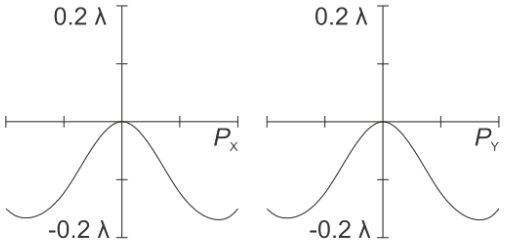
Фильтр и линза поля. Линза поля была установлена в свою оправу таким образом, чтобы ее оптический центр совпадал с центром оправы. При правильной установке фильтра лазерный луч должен попасть в центр защитного стекла оптической стопы ИПФ и отразиться к центру экрана интерферометра. Поверхности защитных стекол фильтра просветлены для красной области спектра. Чтобы увеличить яркость отраженного лазерного пучка, во фланец окна фильтра вворачивается стекло в оправе (зеркальное или отрезающий фильтр), поверхность которого предварительно сделана параллельной защитному стеклу ИПФ. Надо заметить, что и поверхность входного интерференционного фильтра должна быть установлена параллельно входному (выходному) окну кристаллооптической

стопы. ИПФ приводится на оптическую ось и в автоколлимацию продольными и наклонными подвижками посадочной площадки. После юстировки ИПФ вынимается из посадочной площадки, так как его полоса не пропускает излучение в линии 6328 Å. Для контроля волнового фронта телескопа в этой линии вместо ИПФ устанавливается имитатор из прозрачного стекла.

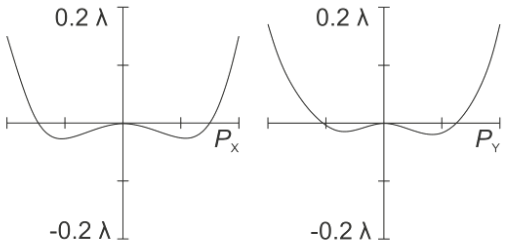
Перестраивающий объектив. Предварительно монтировка оправы объектива с установленной в ней базовой диафрагмой Д2 выставляется перпендикулярно лазерному пучку по автоколлимации от вспомогательного зеркальца. Сами линзы объектива и оправа линз были хорошо центрованы, и после установки оправы в монтировку блики попали в центр экрана. Посадочный фланец видеокамеры (не показан на рисунке) по лазерному лучу был приведен на ось телескопа.

4.1.1.1.6. Волновой фронт оптики хромосферного телескопа и «новый свет»

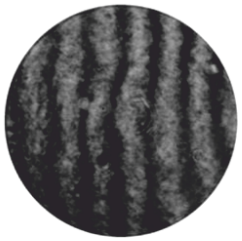
Интерферограммы волнового фронта телескопа (рис. 183) были получены в автоколлимационной схеме с плоским эталонным зеркалом. Перед началом исследований в помещении были выровнены температурные градиенты. Интерферограммы показывают, что качество оптики телескопа обеспечивает выполнение критерия Релея. Волновой фронт модернизированного ИПФ, измеренный по отдельным блокам на интерферометре Твайсмана, находится также в допустимых пределах. Ниже приведен снимок хромосферы полного диска Солнца в линии Hα с апертурой телескопа 120 мм с выдержкой 0.01 с (рис. 184). Полуширина полосы фильтра 0.47 Å. Пространственное разрешение ~1″.



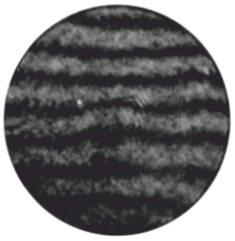
(а) Расчетные волновые аберрации (λ=0.6563 мкм) для точки на оси



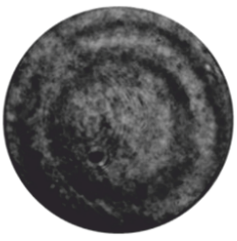
(б) Расчетные волновые аберрации (λ=0.6563 мкм) для точки на краю поля зрения 16′



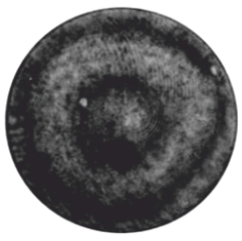
(в) Интерферограммы (λ=6328 Å) в двойном ходе для точки на оси



(г) Расчетный волновой фронт, точки на оси



(д) зафокальное изображения



(е) предфокальное изображения

Рис. 183. Волновые аберрации оптики Hα-телескопа

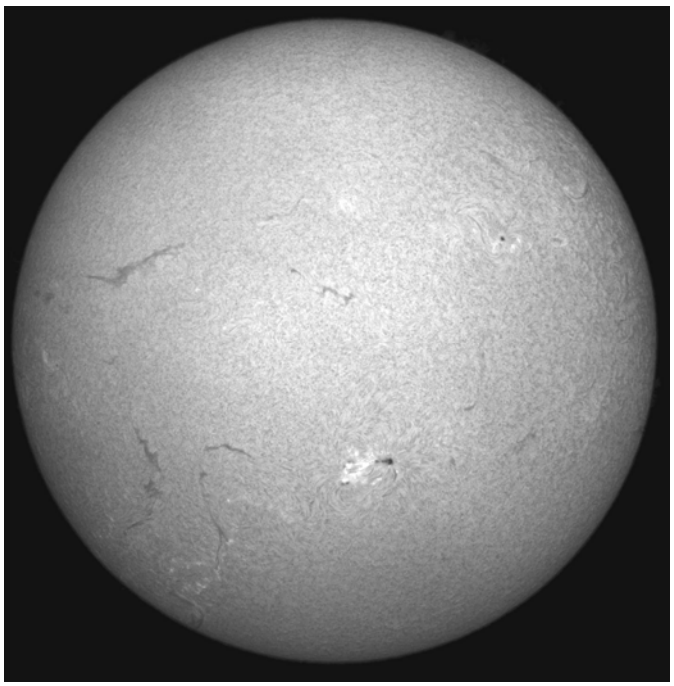


Рис. 184. Изображение солнечного диска, полученное с помощью Hα-телескопа

При номинальном диаметре объектива 170 мм и его высоком качестве можно ожидать получение изображений с более высоким разрешением при хороших атмосферных условиях. Однако эффективный диаметр объектива уменьшен, так как при регистрации изображения полного диска разрешение телескопа уже определено размерами фотодетектора и размером пикселя. Использование всей апертуры может привести к увеличению рассеянного света и неоправданному увеличению тепловой нагрузки на ИПФ. На телескопе при использовании полной апертуры 180 мм и камеры с большим разрешением при хороших астроклиматических условиях можно получить изображения Солнца с разрешением лучше 1″ с сохранением монохроматичности изображения в пределах 0.05 Å по полю зрения.

Хромосферный телескоп БАО снова готов для проведения наблюдений по программе Службы Солнца и научных исследований. Изготовлен новый перестраивающий объектив для получения изображения полного диска Солнца с помощью цифровой видеокамеры Hamamatsu 9300-124 с детектором 36×24 мм (4000×2672 пикселей). Промыта и отъюстирована заново оптика всего телескопа. Выполнен ремонт интерференционно-поляризационного фильтра. Спектральные характеристики ИПФ и фильтра предварительной монохроматизации обеспечивают высокий контраст монохроматических изображений. Интерферограммы волнового фронта оптических элементов и телескопа в целом показывают, что искажения волнового фронта всего оптического тракта находятся в пределах 1/4λ.

4.1.1.2. Развитие технологии получения многослойных покрытий интерференционных фильтров с малым рассеянием и поглощением

Оптические тонкие пленки из высших окислов металлов, таких как Nb_2O_5, TiO_2, SiO_2, ZrO_2 и другие, имеют значительное преимущество перед пленками, полученными по так называемой «мягкой» технологии (ZnS, ZnSe, Na_3AlF_6, MgF_2 и др.). Они имеют большую твердость, что обусловливает значительно большее сопротивление истиранию. Спектральный интервал использования окислов металлов значительно шире и захватывает область от ближнего ультрафиолета до инфракрасной. Светопоглощение в них также ниже. Однако получать окисные пленки простым термическим испарением не представляется возможным, так как при их испарении происходит термическое разложение окислов, в результате чего нарушается их стехиометрия, что приводит к увеличению поглощения света

и нестабильности показателя преломления пленок. Для устранения этого эффекта прибегают к так называемому ионному ассистированию, суть которого состоит в том, что в процессе нанесения пленки, подложка облучается потоком ионов кислорода, что приводит к дополнительному окислению пленки в процессе нанесения непосредственно на подложке. Как правило, в поток ионов кислорода добавляются ионы аргона, которые способствуют уплотнению пленок. Ионное ассистирование используется при термическом (электронно-лучевом) испарении и магнетронном и ионном распылении как окислов, так и чистых металлов. Возможности электронно-лучевого осаждения пленок ограничиваются трудностью получения равномерных по толщине пленок. Это обусловлено тем, что в процессе испарения напыляемого материала образуется кратер, который непредсказуемым образом изменяет индикатрису потока испаряемых частиц. Магнетронное распыление проводится при достаточно высоком давлении в камере (~10^{-3} мм. рт. ст.), что приводит к необходимости уменьшать расстояние магнетрон–подложка. Это, в свою очередь, усложняет получение равномерных по толщине пленок. Поэтому нами выбрана технология ионно-лучевого распыления с ассистированием ионами аргона и кислорода.

При нанесении оптических пленок окислов металлов (TiO_2, Nb_2O_5, SiO_2) ионным распылением металлов с последующим окислением на подложке с помощью ионного ассистирования ионами кислорода и аргона необходим ионный источник, к которому предъявляются следующие требования:

• Источник должен обеспечивать необходимый ионный ток, в нашем случае разрядный ток 2–3 Å.

• Энергия ионов должна быть достаточной для ассистирования, но меньше энергии распыления: 30–50 эВ при величине анодного напряжения ~60–100 В.

• Значения указанных параметров должны поддерживаться во время всего процесса нанесения пленок, который может длиться до 10 ч.

Ранее разработанный ионный источник, построенный по диодной схеме, не обеспечивал длительной стабильности энергии ионов. Это объясняется частичным осаждением на аноде источника окисных пленок, что приводит к повышению напряжения разряда при заданном ионном токе. Повышение потенциала разряда приводит к увеличению энергии ионов вплоть до величины, при которой начинается распыление осаждаемого слоя. Как следствие, снижается скорость роста пленки в 1.5–2 раза. Попытка устранить это явление конфигурацией анода не привела к желаемому результату.

В ходе работ был разработан и изготовлен ионный источник с переменным анодом, а также высокочастотный ИИП (импульсный источник питания). Источник питания является генератором прямоугольных импульсов частотой 50 кГц, напряжением 800 В и током до 150 мА. Схема источника приведена на рис. 185. ИИП построен по полномостовой схеме с использованием двух микросхем IR2110. Цепочки D1-C3 и D2-C4 образуют бутстрапные цепи управляющих электродов верхних плечей моста (T1, T3), которые создают напряжение +12 В относительно эмиттеров соответствующих транзисторов. Сопротивления R1–R4 обеспечивают задержку открытия соответствующих транзисторов. Диоды D3– D6 обеспечивают быстрый разряд емкости входных электродов, т. е. быстрое закрывание транзисторов. Трансформатор Tr1 имеет 7 витков провода 4×0.9 мм. Вторичная обмотка 200 витков, литцендрат 12×0.05 мм. Сердечник — Ш-образный феррит с диаметром центрального керна 10 мм.

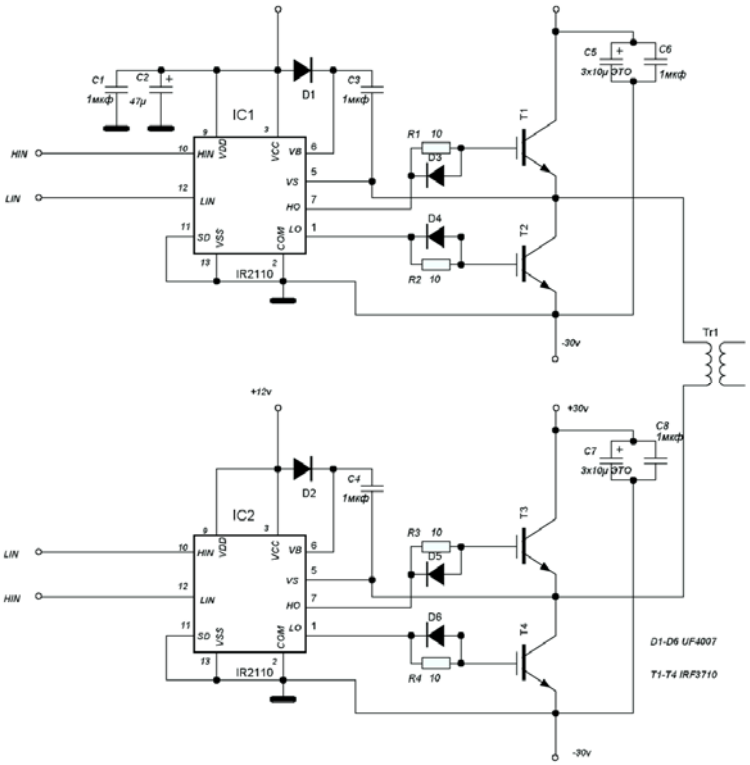


Рис. 185. Схема импульсного источника питания

При испытании ионного источника был выявлен следующий недостаток. При работе источника происходит довольно сильный разогрев анода, который имеет тепловой контакт с магнитной системой, что из-за низкой температуры Кюри приводило к размагничиванию части магнитов системы. Для устранения этого недостатка сделаны изменения в конструкции, показанные на рис. 186. В крышку 1 врезаны три керамических изолятора 2, фиксирующие детали анода в корпусе источника. Ранее эту функцию выполняло кольцо из силиконовой резины, которое под воздействием потока ионов подвергалось разрушению. Для защиты магнитной системы от нагрева введен экран 3, который крепится на водоохлаждаемый блок шестью винтами М2.5, обеспечивая тепловой контакт как минимум в шести точках. Выходная часть анода 4 крепится к экрану аналогичным способом на винтах М3. Детали 3 и 4 изготовлены из Д16Т. Таким образом, все детали анода имеют теплоотвод, защищающий магнитную систему от нагрева. Испытание источника ионов в течение 27 ч показало, что напряжение на аноде при нанесении TiO_2 колеблется от 100 до 110 В, при нанесении SiO_2 — от 95 до 100 В.

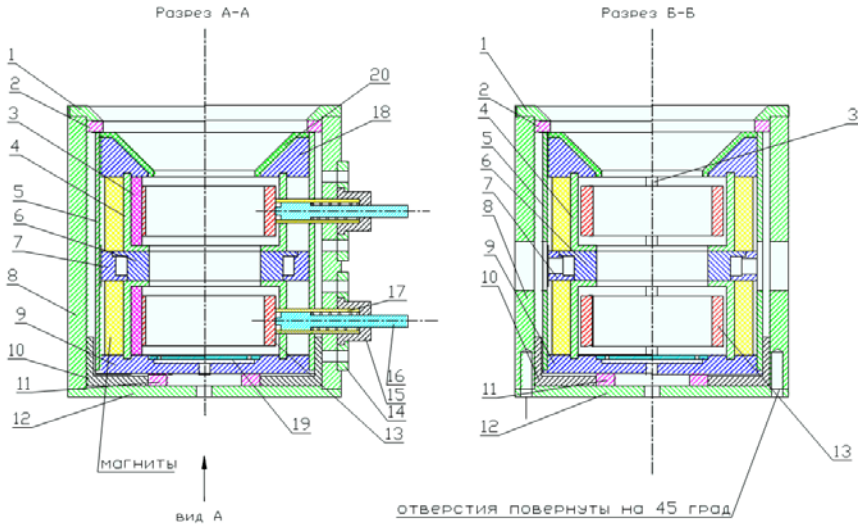


Рис. 186. Измененная конструкция ионного источника

Параметры для предыдущей версии ионного источника: при нанесении SiO_2 — от 97 до 146 В, TiO_2 — от 118 до 194 В. Время нанесения четвертьволновой пленки (контрольная длина волны 640 нм) для TiO_2 составила 30 мин, для SiO_2 — 12 мин. Следующим этапом предполагается оснащение вакуумной установки более производительным криогенным насосом, что позволит увеличить скорость нанесения пленок и обеспечить более высокую их чистоту по сравнению с тем, что давал имеющийся паромасляный насос.

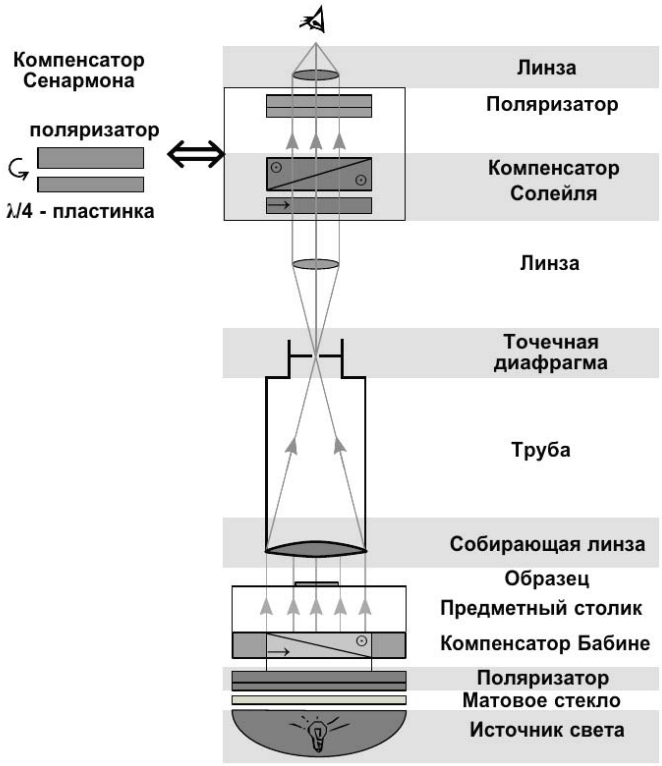
4.1.1.3. Фазовые пластинки для поляризационных наблюдений. Сравнение методик измерений разности хода в фазовых пластинках из полимерных материалов

Фазосдвигающие системы используются в поляриметрии небесных объектов при измерении магнитных полей и для исправления инструментальной поляризации телескопов. Они находят применение в интерференционно-поляризационных фильтрах, в волоконно-оптической технике, а также в качестве элементов лабораторных оптических приборов, в электрооптических модуляторах и др. В связи с постоянным ростом апертуры солнечных телескопов, масштаба изображений и линейного поля зрения (участка солнечного диска, подлежащего исследованию) возникает потребность в крупногабаритных фазовых пластинках. Фазовые замедлители большой апертуры требуются не только во многих астрономических, но также в аэрокосмических оборонных проектах. Такие устройства невозможно сделать на базе природных и существующих искусственных двупреломляющих кристаллов. Наблюдается тенденция замены кристаллических фазовых пластинок на полимерные. Полимерные материалы являются более дешевыми и доступными. Они позволяют достичь увеличения углового и рабочего поля приемной аппаратуры. За рубежом это можно проследить по разработкам многих оптических компаний. Например, компания Meadowlark Optics [1], которая имеет 35-летний опыт производства фазовых пластинок, способна их изготавливать со световым диаметром до 100 мм и более из различных полимерных материалов и обеспечить их применение в световых пучках различной мощности.

В ИСЗФ СО РАН имеется опыт разработки технологии изготовления ахроматических систем из тонких полимерных пленок первого порядка интерференции — дисперсионных систем из полипропилена и лавсана и компенсационных систем из 3–5 пленок-компонент из полипропилена. Для соединения тонких пленок в многокомпонентную систему предложен метод ориентации и полужесткого крепления компонент и сборки систем между защитными стеклами. Изготовленные в ИСЗФ СО РАН ахроматические системы применяются для наблюдений Солнца в обсерваториях нашей страны и за рубежом.

В настоящее время в ИСЗФ СО РАН разрабатываются методы контроля и изготовления крупногабаритных фазовых систем (пластин) на основе твердых полимеров поликарбоната и полиэтилентерефталата. Компоненты таких фазовых систем — это плоскопараллельные пластинки, изготовление которых требует применения не только высокой технологии оптической обработки, чтобы выдержать строгие допуски на их параметры, но также и прецизионных методик и приборов для измерений параметров. В ИСЗФ СО РАН развивается база для прецизионного изготовления и контроля крупногабаритных плоскопараллельных пластин. В обработке пластин предусмотрен метод двусторонней оптической полировки, который ранее впервые в России был разработан в ИСЗФ СО РАН [2]. К пластинам предъявляются очень жесткие требования на соблюдение таких параметров, как оптическая однородность, толщина, плоскостность, плоскопараллельность. Другими словами, пластины, которые могут быть размером 100 мм и больше, должны иметь одинаковую оптическую толщину (разность фаз) по всей поверхности. Ниже приведены описание методов контроля разности фаз и результаты исследований параметров полимеров, предназначенных для изготовления фазовых пластин. Основой параметр фазовых пластинок — фазовый сдвиг $\delta = 2\pi\mu d/\lambda$ (или порядок интерференции $N = \mu d/\lambda$). Как правило, для новых материалов сложно найти в открытых источниках табличные значения показателя двойного преломления $\mu = n_e - n_o$, поэтому величину сдвига целесообразно определять

экспериментально. Для измерения фазового сдвига нами использовались: метод компенсации двупреломления (фазовые компенсаторы) и метод исследования эллиптически поляризованного света (анализатор азимута, канавчатый спектр). Был сконструирован прибор, сочетающий три фазовых компенсатора: Бабине, Солейля и Сенармона. Прибор имеет единую систему поляризаторов и объективов (рис. 187, *а*, *б*).



(а) Оптическая схема компенсатора

(б) Разработанный прибор: компенсатор Бабине-Солейля-Сенармона

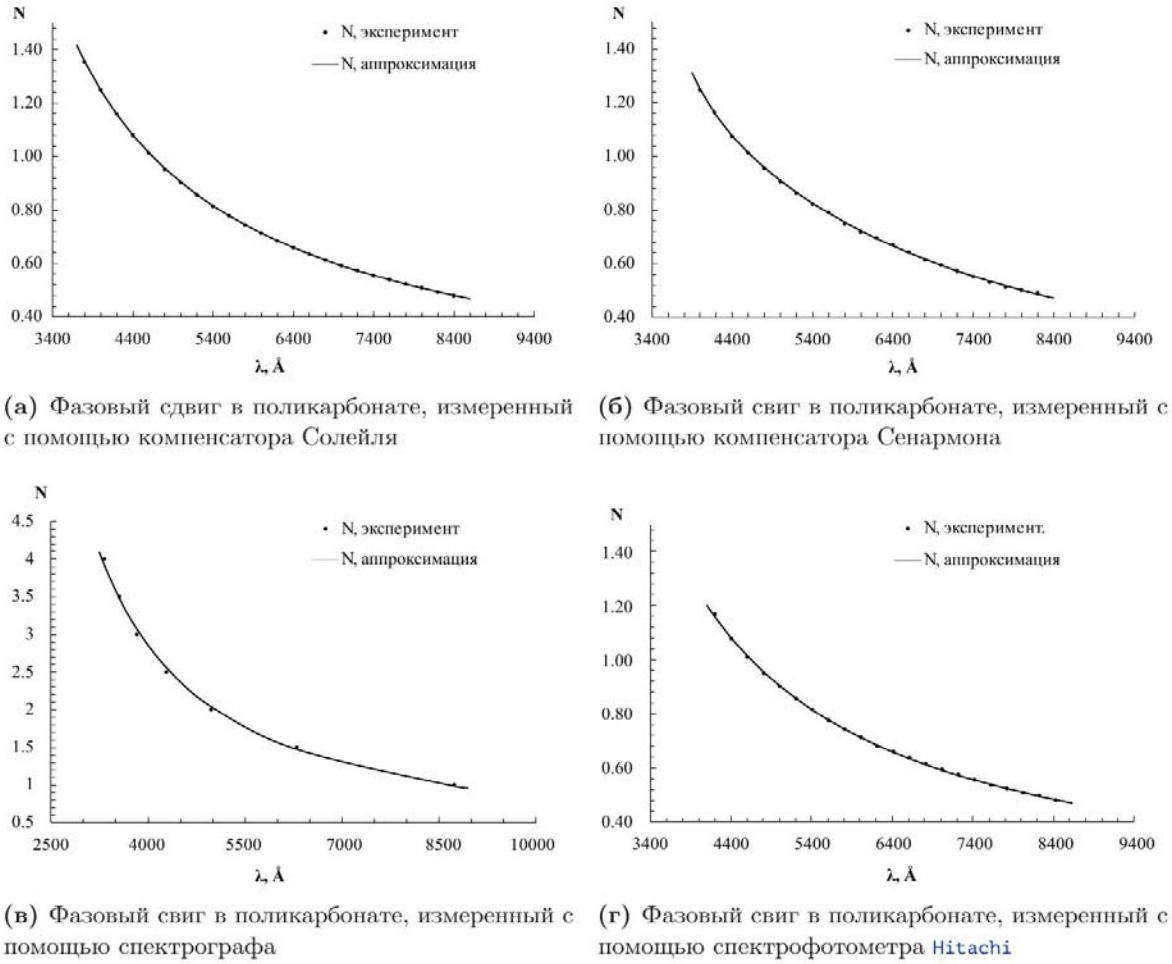
Рис. 187. Оптическая схема и стойка компенсатора Бабине–Солейля–Сенармона

Фазовые компенсаторы — устройства, вносящие любую разность хода, компенсирующую до нуля или дополняющую до π разность фаз, созданную пластинкой, и превращающие эллиптически или циркулярно-поляризованный свет в плоскополяризованный. Принцип работы фазовых компенсаторов основывается на следующем: при прохождении света в клиньях (или в клиньях и пластинке) с ортогональной ориентацией оптических осей возникает дополнительная разность фаз. За счет подвижности одного из клиньев меняется их суммарная толщина, а в месте, где толщины совпадают, дополнительная разность фаз равна нулю. В белом свете для компенсатора Бабине нулевая фаза наблюдается в виде черной полосы на клине, в монохроматическом — чередование темных и светлых полос. В компенсаторе Солейля в обоих случаях наблюдается полное погашение поля зрения из-за одинакового приращения толщины по этому полю, что позволяет определять разность фаз, не превышающую 2π, а также оценивать глазом однородность фазового сдвига в пределах этого поля с помощью чувствительного цвета, образуемого при наложении цветов [3, 4].

В отличие от компенсаторов Бабине и Солейля компенсатор Сенармона относится к эллиптическому типу, когда не происходит компенсация двупреломления, а исследуется эллиптически поляризованный выходящий из образца свет, который превращается в линейный после прохождения $1/4\lambda$-пластинки и гасится анализатором. Угол поворота анализатора в положении погасания и есть мера двойного преломления.

Достоинство разработанной системы — большое рабочее поле и использование трех методов измерения фазового сдвига в пластинках. Недостатки — наличие напряженности в объективах около 0.01 величины фазового сдвига, ограниченный спектральный интервал, требующий узкополосных светофильтров и ограниченная спектральная чувствительность глаза. Для устранения этих недостатков был использован монохроматор МДР-12 с регистрацией сигнала на самописец ЭПП-09, кристаллические поляризационные призмы с высоким спектральным пропусканием и ограниченным рабочим полем (около 1 см), на котором не сказывается влияние объективов [5]. Метод позволяет повышать чувствительность сигнала за счет изменения яркости лампы накаливания, регулировки ширины щели и настраиваемой чувствительности ФЭУ (фотоэлектронный умножитель) и проводить измерения в интервале 3800–8500 Å. При $\lambda > 8500$ Å чувствительность ФЭУ падает, способ возможного совершенствования метода — замена ФЭУ на ПЗС-приемник.

Были проведены измерения фазового сдвига в пластинке из поликарбоната методом Солейля и Сенармона с использованием отрезающих фильтров. Во время измерений регистрировались не положения минимумов пропускания системы, а положения справа и слева от минимума при одинаковом значении пропускания, затем само положение минимума находилось как среднее значение. Неполная ахроматичность 1.4λ-пластинки и неточная ориентации кристаллических элементов компенсатора Солейля приводят к неполному погасанию пучка света (не контрастный минимум) и появлению дополнительной модуляции в случае метода Солейля. Неточная ориентация поляризаторов влияет лишь на глубину максимумов и минимумов интерференции. На рис. 188, *а*, *б* представлены экспериментальные данные фазового сдвига (точки на графиках) методом Солейля и Сенармона, аппроксимированные дисперсионным уравнением Зельмейера [6].



(а) Фазовый сдвиг в поликарбонате, измеренный с помощью компенсатора Солейля

(б) Фазовый свиг в поликарбонате, измеренный с помощью компенсатора Сенармона

(в) Фазовый свиг в поликарбонате, измеренный с помощью спектрографа

(г) Фазовый свиг в поликарбонате, измеренный с помощью спектрофотометра Hitachi

Рис. 188. Результаты измерений фазового сдвига в поликарбонате

Метод Сенармона позволяет определять фазовый сдвиг пластинки в одной длине волны, а спектрофотометры — получить информацию о фазовом сдвиге в широком спектральном диапазоне с помощью канавчатого спектра, который характеризует распределение интенсивности и поляризации света в двупреломляющем кристалле. После прохождения света через кристаллическую пластинку луч становится эллиптически поляризованным. При скрещенных поляризаторах максимальная интенсивность (I=1) соответствует фазовому сдвигу кратному 1/2λ. Минимальная интенсивность (I=0) соответствует целому значению разности хода. В работах [7, 8] описывается методика интерпретации данных, полученных этим способом.

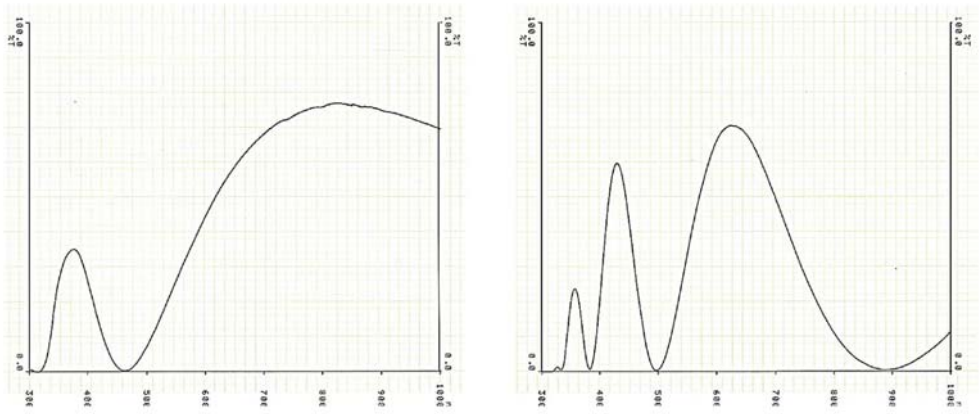

(а) Поликарбонат (б) Полиэтилентерефталат

Рис. 189. Канавчатые спектры, полученные на спектрофотометре Hitachi A-3800

На спектрофотометре Hitachi A-3800 (щель 6 нм, скорость сканирования 300 нм/мин) были получены спектры пропускания полиэтилентерефталата и поликарбоната при скрещенных поляризаторах (рис. 189, *а*, *б*). Минимумы на спектрограмме соответствуют целым порядкам фазового сдвига, а максимумы — полуцелым. Видно, что пластинка поликарбоната является пластинкой нулевого порядка в области ≥ 4625 Å и пластинкой первого порядка в области 3780 Å≤ λ ≤4625 Å. Полиэтилентерефталат — двупреломляющий материал более высокого порядка интерференции. При уменьшении λ порядки интерференции увеличиваются, а ширина контура уменьшается. Зная, что соседние максимумы (минимумы) отличаются на порядок, рассчитывается значение величины двупреломления μ по формуле:

$$\mu = \frac{\lambda_ц \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2) d}, \qquad (22)$$

где λ_1, λ_2 — длины волн соседних максимумов (минимумов), $\lambda_ц$ — центральная средняя длина волны между λ_1, λ_2; d — толщина полимера, определяемая микрометром с точностью до нескольких микрон. На рис. 188, *в* точками показаны наблюдаемые значения порядка интерференции N, а сплошной кривой — значения, сглаженные дисперсионным уравнением Зельмейера.

Достоинство спектрофотометрического метода — получение на одной спектрограмме данных о фазовом сдвиге пластинки в широком спектральном диапазоне. Необходимо учитывать, что на точность измерений влияют спектральная чистота спектрофотометра, точность определения максимумов (минимумов) спектра и определение толщины пластинки. Метод применим только к двупреломляющим материалам с высоким порядком интерференции и позволяет непосредственно определять только целые порядки интерференции, дробные рассчитываются через аппроксимирующее уравнение. Кроме того, при обработке данных по формуле 4.1.1 полученные нами значения N не совпадают с минимумами/максимумами спектра. Таким образом, приходится вводить дополнительную выборку:

расчет по формуле начинать с синей области, а отсчет N, $N + 1$, $N + 2$, …$N + n$ — с красной, предварительно округлив N до целого (минимум) или полуцелого (максимум) числа.

Для повышения точности измерений канавчатый спектр можно получать на спектрографе с высоким разрешением, но методика обработки отличается от методики спектрофотометра, так как на ПЗС-фотодатчике умещается не более одного минимума (максимума) канавчатого спектра фазовой пластинки невысокого порядка. Нами получены канавчатые спектры поликарбоната на дифракционном автоколлимационном зеркальном спектрографе: решетка 200×300 мм, 600 штрихов/мм, фокусное расстояние зеркала 600 см, дисперсия решетки 0.0217 Å/пиксель для первого порядка. Спектры зарегистрированы на видеокамеру с линейным ПЗС-датчиком MOPC1/3648/PCI с разрешением 3648 пикселей / 29.18 мм.

Фазовый сдвиг рассчитывается из смещения канавчатого спектра исследуемого кристалла относительного спектра опорного (базового) кристалла. В качестве опорного кристалла использовался кварц с высоким порядком интерференции. Поликарбонат и кварц помещаются на оптическую скамью перед щелью спектрографа в параллельном пучке между скрещенными поляризатором и анализатором, источник света — лампа накаливания (рис. 190). Длина волны устанавливается по шкале гониометра с точностью до 0.1 Å. За счет сложения (вычитания) оптической толщины опорного кристалла и пластинки изменяется разность хода, и, следовательно, канавчатый спектр получает смещение по кадру (рис. 191). Фазовый сдвиг определяется по величине этого смещения. С расчетом данного смещения в интервале 4000–8500 Å, строится кривая $N(\lambda)$ (рис. 188, *г*). Минимумы определялись как среднее значение между двумя значениями одинаковой интенсивности.

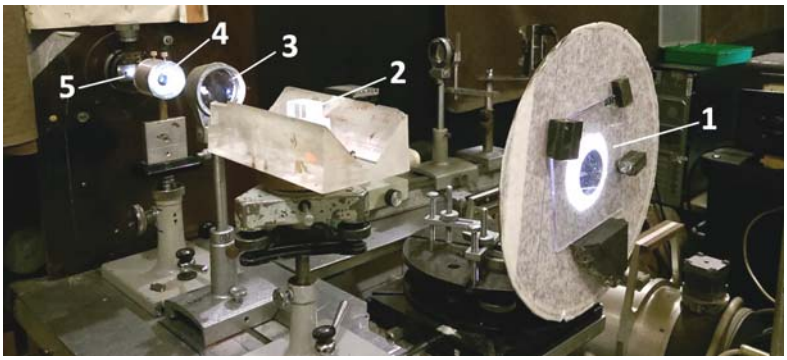


Рис. 190. Оптическая система для определения фазового сдвига на спектрографе: 1 — исследуемая пластинка, 2 — опорный кристалл, 3 — собирающий объектив, 4 — кристаллический поляризатор, призма Глана–Томпсона, 5 — входная щель спектрографа

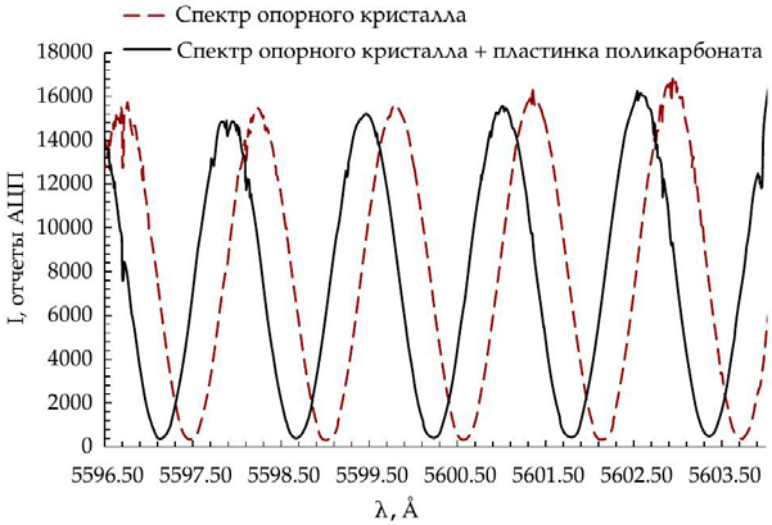


Рис. 191. Канавчатые спектры кварца и кварца с поликарбонатом, полученные на спектрографе

Анализ возможных ошибок показывает, что определение положение минимумов осуществляется с точностью ±4 пикселя = 0.005 доли интерференционной полосы в красной области и ±3.3 пикселя = 0.008 доли полосы в синей области. Неточность поворота исследуемой пластинки на ±5° вносит ошибку в 0.006. Неточность установки длины волны по шкале гониометра порядка 1′ смещает канавчатый спектр по кадру, но не вносит изменение в величину фазового сдвига. Рабочее поле зрения прибора мало и составляет величину порядка 1 см, поэтому влияние двойного преломления из-за напряжения стекла на измерения является незначительным.

В таблице 8 представлены значения фазового сдвига пластинки из поликарбоната, полученные тремя способами. Лучшую повторяемость и наименьший разброс значений (несколько тысячных) дает метод Солейля и метод на спектрографе. Наибольший разброс у метода Сенармона, до 0.01–0.03 фазового сдвига, который может быть вызван неполной ахроматичностью четвертьволновой пластинки в выбранном спектральном диапазоне. Для измерений фазовых пластинок ненулевого порядка для определения целой и дробной части сдвига необходимо применять несколько методов.

Таблица 8. Фазовый сдвиг в пластинке из поликарбоната, измеренный тремя способами.

λ, Å	Компенсатор Солейля	Компенсатор Сенармона	Спектрограф
8400	0.48	0.47	0.48
8200	0.49	0.49	0.49
8000	0.51	0.50	0.51
7800	0.52	0.52	0.52
7600	0.54	0.54	0.54
7400	0.56	0.55	0.55
7200	0.57	0.57	0.57
7000	0.59	0.59	0.59
6800	0.61	0.62	0.61
6600	0.64	0.64	0.63
6400	0.66	0.67	0.66
6200	0.69	0.69	0.68
6000	0.71	0.72	0.71
5800	0.74	0.75	0.74
5600	0.78	0.79	0.78
5400	0.82	0.83	0.81
5200	0.86	0.87	0.86
5000	0.90	0.91	0.90
4800	0.96	0.96	0.95
4600	1.01	1.01	1.01
4400	1.08	1.08	1.08
4200	1.16	1.15	1.16
4000	1.25	1.25	1.25
3800	1.36	1.39	1.35

Публикации:

1. Хромосферный телескоп БАО ИСЗФ. Новый свет // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 69–85. DOI: 10.12737/17376.

2. Pevtsov A.A., Nagovitsyn Y.A., Tlatov A.G., Demidov M.L. Solar physics research in the russian subcontinent: Current status and future // Asian J. Phys. 2016. June. V. 25. arXiv: 1606.01331.

Список использованных источников:

1. Meadowlark Optics Inc. http://www.meadowlark.com.
2. Способ двустороннего полирования пластин: 828539 Рос. Федерация: B24B37/04/ Домышев Г.Н., Садохин В.П., Скоморовский В.И. Заявитель ИСЗФ СО РАН. Заявл. 16.11.1977. Бюл. № 45.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. Т. IV. М.: Наука, 1980. 752 с.
4. Карташев А.И., Эцин И.Ш. Методы измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах // Успехи физических наук. 1972. Т. 106. С. 687–721.
5. Демидов М. Л., Скоморовский В. И. Исследование двупреломляющих полимеров на спектрокомпенсаторе // Иссл. по геомагнетизму, эрономии и физике Солнца. 1982. Т. 60. С. 71–75.
6. Малькин А. А. Разработка методики проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стекол: Дис… канд. тех. наук: Москва, 2014. 148 с.
7. Emam-Ismail M. Determination the optical birefringence of multiorder gypsum wave plate in the wavelength range 400–1000 nm using polarized channeled spectra // J. Natural Sci. Math. 2010. V. 4, N 1. P. 1–17.
8. Hlubina P., Ciprian D. Birefringence dispersion in a quartz crystal retrieved from a channelled spectrum resolved by a fibre-optic spectrometer // Optics communications. 2011. V. 284, N 12.

4.1.2. Разработка и ввод в эксплуатацию автоматизированной системы управления Большим солнечным вакуумным телескопом

4.1.2.1. Основные характеристики БСВТ

Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ) — один из крупных солнечных телескопов, относящихся к прошлому поколению инструментов для изучения Солнца (рис. 192). В настоящее время за рубежом идет интенсивное развитие аналогичных телескопов с целью полностью реализовать их потенциал. Главным образом такие телескопы оснащаются АОС (адаптивная оптическая система) и современными АСУ (автоматизированная система управления) — становится возможным повысить пространственное и временное разрешение, а также автоматизировать многие операции по наведению телескопа, получению и обработке данных, калибровке и обеспечению работы вспомогательных систем. Такая модернизация повышает эффективность использования имеющихся инструментов и расширяет круг экспериментальных задач, доступных для решения в настоящее время. В результате совместных работ с ИАиЭ СО РАН (Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук) для БСВТ была создана АСУ, отвечающая современным научным задачам физики Солнца.

БСВТ имеет ориентированную вдоль полярной оси вакуумную трубу, в которую свет от Солнца попадает, отражаясь от плоского зеркала сидеростата диаметром 1 м, через верхний иллюминатор и объектив со световым диаметром 726 мм и фокусным расстоянием 40 м. Монтировка зеркала поддерживается вертикальной колонной высотой 25 м. Зеркало сидеростата вращается вокруг полярной оси с часовой скоростью 15″/с для слежения за Солнцем. Участок изображения Солнца диаметром 100 мм отражается от диагонального зеркала и через боковой иллюминатор вакуумной трубы попадает на щель и щечки спектрографа, которые находятся в фокусе объектива. Часть солнечного пучка проходит мимо диагонального зеркала через нижний иллюминатор вакуумной трубы и фокусируется на палетке координатометра, плоскость которой нормально ориентирована к оптической оси телескопа, а центр вращения координатометра совпадает с оптической осью. Это изображение диаметром 38 см используется для работы подсистемы гидирования.

Рис. 192. Большой солнечный вакуумный телескоп, Байкальская астрофизическая обсерватория, п. Листянка

4.1.2.2. Назначение и основные функции АСУ

Решение актуальных задач физики Солнца нуждается в новых экспериментальных данных. Получение таких данных в случае уже имеющихся телескопов подразумевает расширение их функциональных возможностей. Проведение эксперимента зависит от многих факторов: условий наблюдения, т. е. состояния земной атмосферы, состояния Солнца (уровня его активности и наличия в его атмосфере различных структур и др.), доступности оборудования для анализа и регистрации электромагнитного излучения, а также от научной задачи, на решение которой нацелен эксперимент. Для каждого случая требуется соответствующая подготовка как самого телескопа, так и научных приборов. На астрофизических инструментах, построенных в прошлом веке, многие операции по обеспечению хода эксперимента выполняются непосредственно наблюдателем, что существенно ограничивает круг решаемых задач. В значительной степени преодолеть эти ограничения можно с помощью современных АСУ.

Современные подходы к созданию АСУ позволяют получить систему, гибко конфигурируемую для нужд конкретного эксперимента. В такой системе большинство операций выполняется автоматизированно — это касается как основных функций по наведению телескопа, так и вспомогательных функций технологических подсистем. Например, до создания АСУ управление приводами БСВТ осуществлялось оператором с помощью механических тумблеров включения/выключения. Положение устройств контролировалось стрелочными приборами. Управление и контроль вспомогательными подсистемами осуществлялись с пультов управления, расположенных в удаленных от оператора помещениях. Возможность оперативного контроля работы отсутствовала. Созданная АСУ берет на себя рутинную работу по контролю всех подсистем, а также предоставляет централизованное управление системой как целым.

Одной из основных целей создания АСУ было сокращение времени, которое наблюдатель тратит на подготовку систем к наблюдениям, а также возможность подготовки экспериментов нового типа. К последним, в частности, относятся многоволновые исследования солнечной атмосферы, а также исследования динамики нестационарных процессов в фотосфере и хромосфере активных областей.

4.1.2.3. Устройство АСУ

4.1.2.3.1. Общее описание

Аппаратная часть АСУ в основном представлена приводами и датчиками положения подвижных элементов телескопа. Для обеспечения возможности точного наведения телескопа в АСУ использованы современные шаговые двигатели, а также прецизионные энкодеры. Достижение аппаратной точности наведения не хуже чем 0.5″ стало возможным благодаря модернизации приводов зеркал БСВТ. Многие узлы к моменту модернизации износились и выработали свой ресурс, некоторые редукторы имели неоптимальные передаточные отношения для работы шаговых двигателей. В ходе работ все зубчатые передачи были проверены и отремонтированы. Для новых двигателей были изготовлены крепления, а также муфты для передачи крутящего момента с вала двигателя на редуктор. В некоторых случаях потребовалось изготовление новых зубчатых передач. Для новых датчиков углового положения и датчиков концевых положений были разработаны механические узлы крепления, обеспечивающие необходимую точность для работы АСУ.

БСВТ представляет собой крупный телескоп, элементы его питающей оптики расположены на расстоянии более 40 м друг от друга. При проектировании линий связи и питания этот факт был учтен для обеспечения стабильной работы системы, а также удобства эксплуатации и обслуживания. Линии питания и связи сгруппированы по территориальному расположению на телескопе, их коммутация с АСУ осуществляется в специальных шкафах. В последних установлены соответствующие источники питания и преобразователи сигналов для передачи их в управляющий компьютер АСУ. Все приводы телескопа подключены через специальные адаптеры: в них осуществляется коммутация линий питания, связи и концевых выключателей. С этой точки зрения созданная АСУ является распределенной системой.

Благодаря электрической и вычислительной частям созданная АСУ является по существу новой цифровой системой. Имевшиеся кабели питания и связи старой АСУ не удовлетворяли предъявляемым требованиям, а в ряде случаев использовались с превышением допустимого срока эксплуатации — они были заменены на новые медные подходящего сечения. Это позволило сократить тепловые потери там, где нагрузка на кабели была на границе нормы, и исключить вероятность поражения электрическим током из-за старения изоляции. Приборы электроустановок были заменены на современные, имеющие меньшее время срабатывания при коротком замыкании, меньшие тепловые потери и поддерживающие современные стандарты размещения. Использование современных автоматических выключателей позволило улучшить селективность электрических сетей и тем самым добиться более определенного поведения оборудования в нештатных ситуациях.

Одной из важных задач стало обеспечение цифровой связи между различными подсистемами АСУ, расположенными на значительном удалении друг от друга, а также от центрального узла управления. Для этого были проложены новые линии связи с заменой несущих конструкций: металлорукавов, кабель-каналов и др. Основным видом связи управляющего компьютера и шкафов управления был выбран TCP или UDP через канал Ethernet на основе витой пары. Подключение сделано по топологии «звезда» в виде локальной сети, где каждый узел имеет свой IP-адрес. Для обеспечения связи с устройствами, работающими по протоколу RS-422/485, были созданы специальные преобразователи сигнала для канала Ethernet. Таким образом, в необходимой мере удалось добиться однородности системы, что важно для минимизации затрат по созданию ПО (программное обеспечение), а также дальнейшего сопровождения системы.

4.1.2.3.2. Сидеростат и купол

До модернизации АСУ наведение телескопа на Солнце осуществлялось оператором с помощью прямого управления асинхронными двигателями. Далее для тонкого наведения на объект использовалось прямое управление шаговыми двигателями. Устройство для обеспечения системы координат было спроектировано с использованием аналоговых цепей и преимущественно использовалось для визуального контроля. Все это приводило к значительным задержкам в настройке телескопа и подготовке эксперимента даже у опытных наблюдателей. В ходе работ на приводы сидеростата были установлены шаговые двигатели высокой точности и абсолютные энкодеры Baumer G2M2H для отслеживания его положения и автоматического наведения на Солнце (рис. 193). Асинхронные двигатели перекладки были заменены шаговыми двигателями MDrive34ACPlus, в связи с чем сократилось время первичного запуска телескопа за счёт более точного наведения на Солнце. Устаревшие шаговые двигатели ШД-4 были заменены более точными, мощными и современными MDrive23Plus со встроенными энкодерами. Наличие встроенного энкодера в данном случае позволяет иметь информацию о доступном свободном ходе редуктора точного наведения.

Рис. 193. Модернизированные приводы сидеростатного зеркала БСВТ

Специально для коммутации всех приводов сидеростата БСВТ был разработан объединенный адаптер двигателей. Через это устройство коммутируются линии питания и данных, а также концевые выключатели. Таким образом, стало возможным осуществить централизованное полуавтоматическое управление этими приводами с минимальным участием оператора. Купол выполняет основные функции защиты телескопа от атмосферных осадков, а также шквального ветра. Для эксплуатации БСВТ важно иметь оперативное управление куполом, а также отслеживать обстановку непосредственно на площадке сидеростата. В АСУ было интегрировано управление приводами купола, а отображение его состояния было обеспечено с помощью видеонаблюдения посредством IP-видеокамеры. Визуальный контроль подкупольного пространства, в том числе контроль приводов зеркала и положения монтировки телескопа, также обеспечивается посредством видеонаблюдения. За открытие купола отвечает отдельная подсистема, функционирование которой не требует запуска остальных подсистем АСУ — это важно в случае проведения технических работ с площадки сидеростата. В случае изменений условий наблюдений в благоприятную сторону, АСУ обеспечит автоматизированное открытие купола, а при изменении погодных условий в худшую сторону — беспромедлительное закрытие купола. Таким образом,

увеличивается эффективность использования наблюдательного времени и увеличивается срок службы управляющих элементов, а также отражающего покрытия зеркала сидеростата.

4.1.2.3.3. Главный объектив

Главный объектив — основной оптический элемент БСВТ, с помощью которого строится оптическое изображение солнечного диска на входной апертуре научных инструментов: спектрографов и фильтрографов. Положение объектива в вакуумной трубе телескопа определяет физическое положение фокальной плоскости в пространстве. Поскольку объектив обладает существенным хроматизмом, автоматизированное перемещение объектива является важной функцией АСУ. Наведение объектива прежде выполнялось асинхронным двигателем по светодиодной шкале с точностью 2.5 см. При этом включение привода отслеживалось только по изменению состояния шкалы. Двигатель был заменен на MDrive34ACPlus со встроенным энкодером, что позволило оперативнее получать информацию о перемещении объектива и точнее выполнять его установку.

4.1.2.3.4. Диагональное зеркало

Положение диагонального зеркала имеет очень большое значение, поскольку влияет на заполнение апертуры научных инструментов и вспомогательных оптических систем. В зависимости от наблюдательных задач зеркало может находиться в двух положениях, отличающихся на 90°: направлять пучок света на спектрограф или фильтровый инструмент. АСУ должна обеспечивать как точность положения зеркала, так и оперативную установку в оба положения. Ранее эти требования не выполнялись, так как перемещение зеркала осуществлялось асинхронными двигателями переменного тока со значительной редукцией. В новой АСУ вместо асинхронных двигателей были установлены MDrive17Plus со встроенным энкодером с точностью 2048 шагов на оборот и уменьшенной редукцией, которая позволила увеличить скорость установки зеркала без потери в точности. Благодаря использованию энкодеров появилась возможность запоминать позиции зеркала для разных экспериментальных задач.

4.1.2.3.5. Координатометр

В течение дня изображение Солнца, строящееся главным объективом, вращается. Основным назначением координатометра является наведение телескопа по задаваемым координатам и удержание наблюдаемого участка солнечного диска на щели спектрографа. Координатометр представляет собой подвижную палетку с четырьмя фотодатчиками. Величина хода палетки чуть больше двух размеров изображения Солнца, проецируемого на координатометр (~80 см). Фотодатчики при смещении изображения Солнца относительно палетки вырабатывают сигнал рассогласования, амплитуда которого пропорциональна величине смещения. Этим сигналом управляются двигатели точного наведения, корректирующие положение солнечного изображения.

Старая элементная база не могла обеспечить требуемой точности наведения и постоянно выходила из строя в связи с превышением допустимого срока службы, что приводило к значительным трудозатратам для поддержания этого узла в работоспособном состоянии. Замена двигателей на MDrive17Plus со встроенным энкодером позволила увеличить точность наведения до 0.5 угл. сек, оперативно отслеживать включение, отключение перемещения и положение палетки. При ручном наведении телескопа требуется контролировать попадание пучка не только в трубу телескопа, но и на палетку координатометра. Для этого над координатометром установлена IP-видеокамера, помощью которой можно визуально контролировать работу координатометра и гидирующей системы.

4.1.2.3.6. Вакуумная установка

Для исключения влияния турбулентных воздушных потоков внутри трубы на световой пучок в трубе создается разрежение <30 гПа. Воздух откачивается специальной вакуумной установкой, расположенной в изолированной от остальной части телескопа комнате. Установка представляет собой вакуумный насос с ременным приводом от асинхронного трехфазного двигателя переменного тока мощностью 9 кВт и системой жидкостного охлаждения, включающей в себя патрубки подвода жидкости, бак с термостатом и циркуляционный насос. Отсос воздуха из трубы осуществляется через патрубок диаметром 150 мм. На нем установлен стрелочный манометр для контроля глубины вакуума, затвор с приводом от двигателя постоянного тока, а также сапун для сброса давления между затвором и насосом. Последним исключается обратное раскручивание насоса и всасывание его смазывающей жидкости в патрубок.

Откачивание вакуума занимает порядка 30 мин. До модернизации наблюдатель был обязан на протяжении этого времени находиться в комнате, наблюдать за глубиной вакуума и быть готовым в любой момент закрыть затвор в случае нештатного отключения насоса. В процессе модернизации этот процесс был полностью автоматизирован в ПО TACS (ПО для управления солнечными телескопами, разработанное в ИСЗФ СО РАН с Telescope Automated Control Software). Участие наблюдателя сведено к минимуму — от него требуется лишь нажать кнопку «Вакуумирование трубы → Вкл» (рис. 194). Важно заметить, что при этом была сохранена возможность произвести весь процесс вручную, как из ГИП (графический интерфейс пользователя) TACS, так и из комнаты вакуумной установки (даже без включения системы управления). В системе сохранены ручной затвор, стрелочный манометр и сапун с ручным открытием.

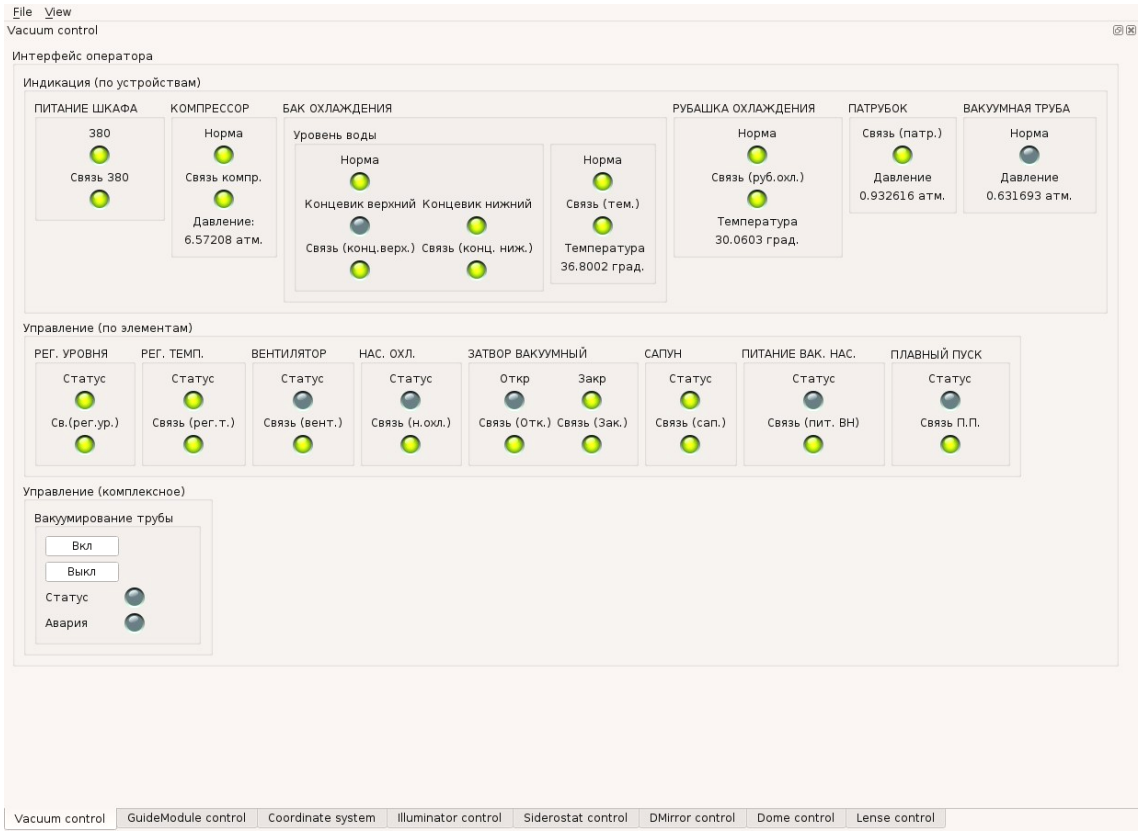


Рис. 194. Подсистема управления вакуумной установкой: графический интерфейс пользователя АСУ

Автоматизация вакуумной установки стала возможной благодаря модернизации аппаратной части: добавлению новых удаленно контролируемых электронных компонентов. Как и в других подсистемах, был установлен шкаф с современными электроустановками: автоматическими выключателями, таймерами, контакторами, расцепителями, регулятором температуры и др. (рис. 195). В патрубок от трубы телескопа были врезаны датчики давления до и после затвора, сам затвор и электропневматический клапан в качестве сапуна. В системе охлаждения был заменен насос на современный циркуляционный с более низким энергопотреблением, в бак встроены датчики уровня и температуры жидкости. Аварийное освещение было заменено на светодиодное, что положительно повлияло на качество освещения и длительность его автономной работы.

Рис. 195. Оборудование АСУ подсистемы вакуумной установки: шкаф управления вакуумной установкой (*а*), вакуумный затвор (*б*)

4.1.2.3.7. Программное обеспечение

При создании ПО АСУ БСВТ использовались решения, выработанные в процессе работы над ПО АСУ АСТ. В качестве среды разработки был выбран инструментарий Qt с использованием системы сборки CMake. Единый интерфейс основан на сервисе межпроцессного взаимодействия D-Bus с возможностью перехода в будущем на технологию OPC-UA для унификации с проектирующимся ПО для КСТ-3 (Крупный солнечный телескоп).

Программа управления представлена в виде клиент-серверной архитектуры. Сервер — программная часть, предоставляющая единый интерфейс управления телескопом. Сервер взаимодействует непосредственно с исполнительными устройствами — приводами и датчиками — на низком уровне и отвечает за такие операции как считываение показаний энкодера, управление двигателями и т.п. Клиент — программа, взаимодействующая с сервером посредством единого интерфейса. К клиентам, в частности, относятся ГИП для управления БСВТ (рис. 196), а также ПО для управления видеокамерами SABRE (ПО, разработанное в ИСЗФ СО РАН, для получения и обработки данных с цифровых видеокамер).

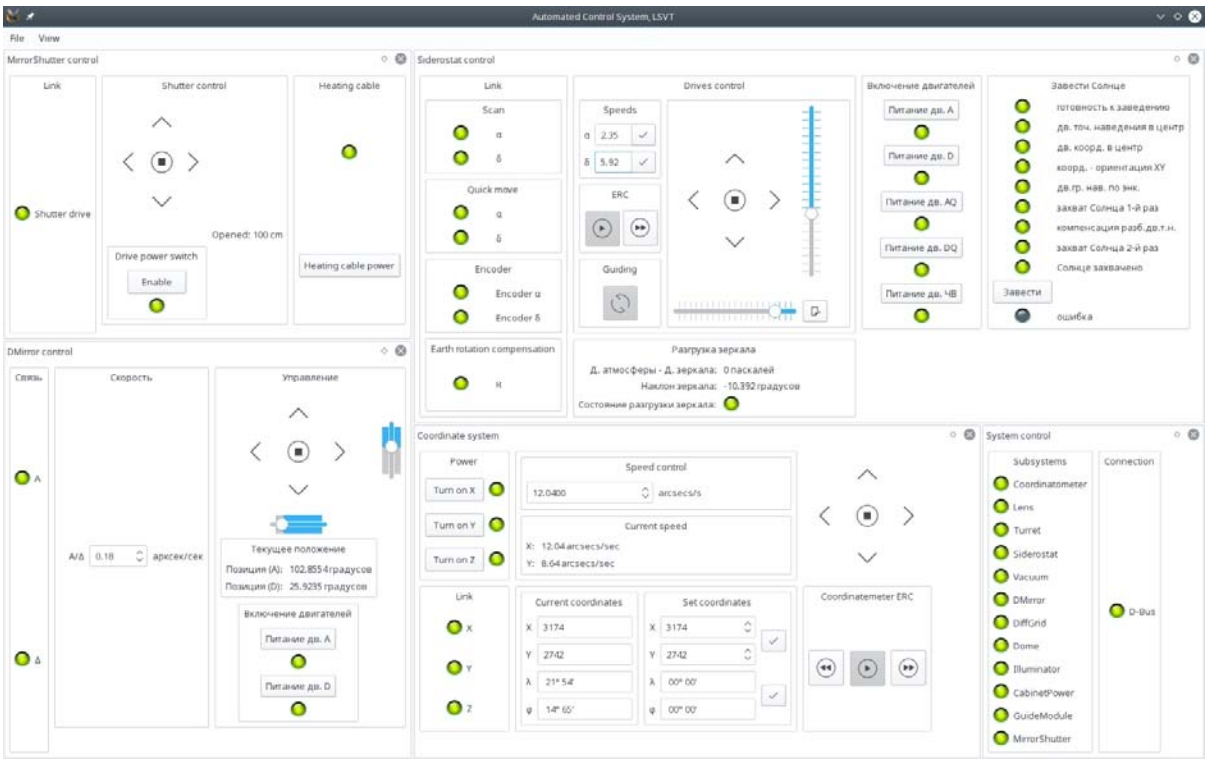


Рис. 196. Основной графический интерфейс пользователя АСУ БСВТ

Серверная часть программы разделена на уровни по задачам управления. На нижнем уровне происходит непосредственное взаимодействие с конечными устройствами аппаратной части: датчиками и приводами. На уровне подсистем реализованы алгоритмы работы телескопа, которые определяются его конструктивными особенностями: фокусировка объектива, наведение сидеростата, вакуумирование трубы и пр. Высший уровень — уровень модуля управления – отвечает за организацию взаимодействия между разными подсистемами и инициализацию системы при запуске. Алгоритмы управления нижнего уровня имеют много общего для различных устройств. Общая кодовая база была структурирована в соответствующие программные компоненты, которые объединили функции управления и для других телескопов: СОЛСИТ (Солнечный синоптический телескоп), АСТ, СТОП-1 (Солнечный телескоп оперативных прогнозов).

Публикации:

Ковадло П.Г., Лубков А.А., Бевзов А.Н., Будников К.И., Власов С.В., Зотов А.А., Колобов Д.Ю., Курочкин А.В., Котов В.Н., Лылов С.А. Лях Т.В., Максимов А.С., Перебейнос С.В., Петухов А.Д., Пещеров В.С., Попопв Ю.А., Русских И.В., Томин В.Е. Система автоматизации большого солнечного вакуумного телескопа // Автометрия. 2016. Т. 2. С. 97–106. DOI:10.15372/AUT20160212.

4.1.3. Модернизация ССРТ в многоволновый (многочастотный) радиогелиограф. Создание спектрополяриметра 50–500 МГц. Разработка методики калибровки и обработки данных радиогелиографа и радиоспектрополяриметров, развитие базы данных и обеспечение доступа к ней

4.1.3.1. Описание многочастотного радиогелиографа

Временное разрешение ССРТ, определяемое принципом формирования изображения, недостаточно для современных задач солнечно-земной физики. Это же можно сказать и о рабочем диапазоне частот. Фактически ССРТ — одночастотный инструмент. По этим причинам был начат процесс преобразования ССРТ в радиогелиограф, использующий апертурный фурье-синтез, с рабочей полосой частот 4–8 ГГц. Созданная к настоящему времени первая очередь радиогелиографа представляет собой Т-образную 48-антенную решетку (рис. 197), лучи которой ориентированы в направлениях запад–восток–юг. Прямофокусные антенны состоят из параболических рефлекторов диаметром 1.8 м с облучателями, принимающими обе линейные поляризации одновременно в полосе частот 4–8 ГГц. Антенные приемные модули преобразуют сигналы линейной поляризации в сигналы круговой поляризации и передают их по оптическим микроволновым линиям в рабочее здание. Здесь сигналы преобразуются вновь в микроволновые, переносятся вниз по частоте и оцифровываются. Перенос вниз по частоте производится с помощью перестраиваемого гетеродина и однополосных смесителей. В качестве гетеродина используется генератор Agilent E8257D, управляемый по локальной сети. Смесители были разработаны в НПФ «Грин» специально для радиогелиографа. Полоса частот смесителей 10–40 МГц, подавление зеркального канала >25 дБ. Частота дискретизации равна 100 МГц, что обеспечивает пятикратное превышение частоты Найквиста для полосы частот 10 МГц и эффективность двухуровневого коррелятора равной 0.8. Формирование мгновенной полосы частот, коррекция геометрической задержки и формирование аналитического сигнала (IQ пары сигналов) производятся уже в цифровом виде для сигнала от каждой антенны. Пара однобитовых сигналов от каждой антенны передается в комплексный коррелятор (рис. 198). Вычисленные в корреляторе комплексные видности передаются программе сбора данных по локальной сети.

Рис. 197. Общий вид 48-антенной решетки Сибирского радиогелиографа

Рис. 198. Приемная система и коррелятор Сибирского радиогелиографа

4.1.3.2. Методика фазовой калибровки и измерения разностей длин кабелей радиогелиографа

Фазовые ошибки измеренных комплексных видностей очень сильно влияют на качество изображения. Точнее говоря, без коррекции фазовых ошибок изображение вообще может не существовать, поэтому так важна фазовая калибровка данных радиогелиографа. В настоящее время для устранения фазовых ошибок, вызванных ошибками положения антенн и задержками в тракте каждой антенны, используется избыточность антенной решетки радиогелиографа — все антенны в каждом плече Т-конфигурации расположены эквидистантно. Пусть видность, измеренная для пары ближайших антенн, будет равна:

$$V_{12} = g_1 g_2^* V'_{12}, \quad (4.1.3.1)$$

где V_{12} — измеренная видность, V'_{12} — истинная видность, g — комплексный коэффициент передачи антенны. Равенство всех антенных баз в одном плече решетки для номеров (n, n+1) подразумевает равенство всех $V'_{n,n+1}$. Это позволяет составить систему из N−1 уравнений, содержащих N+1 неизвестных. Полагая фазы истинной видности и одной из антенн равными 0, мы теряем информацию только о смещении изображения Солнца как целого, зато получаем систему с N−1 неизвестными. Систему уравнений можно записать в следующем виде

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi_1 \\ \phi_2 \\ \dots \\ \phi_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_{12} \\ \Psi_{23} \\ \Psi_{34} \\ \dots \\ \Psi_{(N-1)N} \end{pmatrix} \quad (23)$$

Полученное решение ϕ_n используется для коррекции фаз фурье-гармоник в спектре изображения Солнца, измеренного радиогелиографом. Результат наложения фазовой коррекции на данные радиоглеоиграфа хорошо виден на рис. 199, 200.

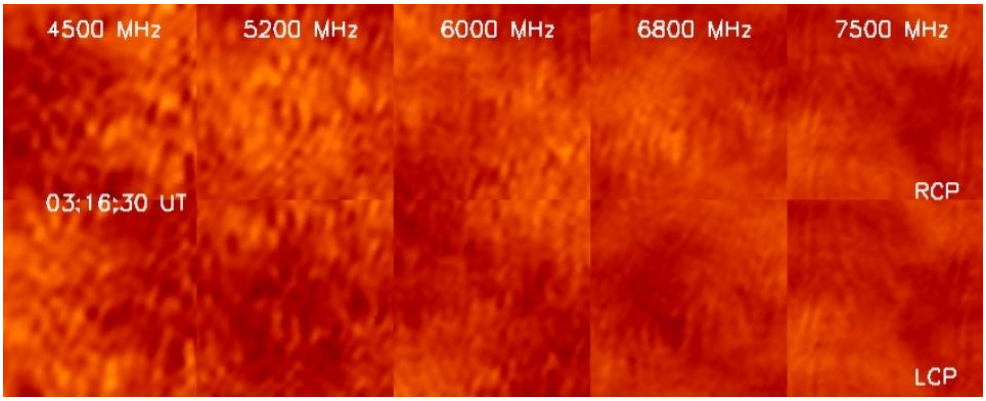


Рис. 199. Данные Сибирского радиогелиографа без фазовой коррекции

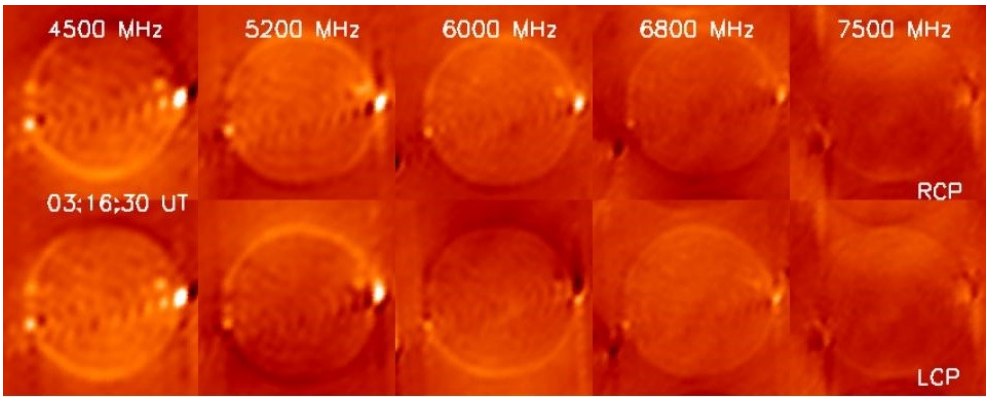


Рис. 200. Данные Сибирского радиогелиографа после фазовой коррекции

Кроме ошибок в положении антенн и разных задержек, вызванных особенностями тракта каждой антенны, существенным фактором, искажающим фазы фурье-гармоник, является разность длин оптических кабелей, соединяющих антенны с приемной системой. Разность в длинах кабелей может достигать нескольких метров и приводить к изменению фазы $\Delta\phi = 2\pi/c \cdot \Delta l \Delta\nu$ в полосе частот 10 МГц на десятки градусов. Чтобы убрать влияние разностей длин кабелей (рис. 201), измеренные длины переводятся в задержки и вносятся в качестве постоянных задержек в тракт каждой антенны. Другими словами, находится антенна с максимальной задержкой, сигнал от которой задерживать не нужно, а сигналы от всех остальных антенн задерживаются на соответствующую разницу задержек.

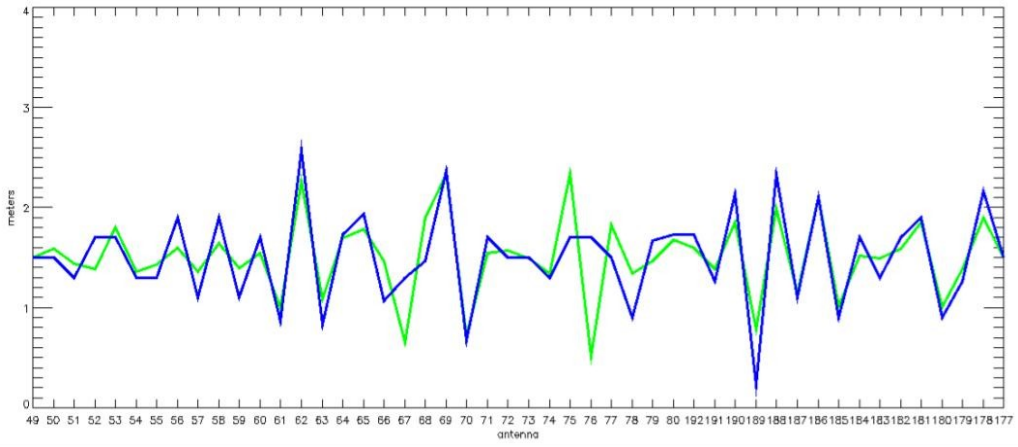


Рис. 201. Разность в длинах кабелей, измеренная с помощью оптического рефлектометра (синяя линия) и полученная путем определения фазовых наклонов (зеленая линия) в откликах комплексных видностей для соответствующих пар антенн

4.1.3.3 Методика совместной обработки данных спектрополяриметров и гелиографов

Совместная обработка данных различных инструментов позволяет получить новую информацию [1]. Данные ССРТ, спектрополяриметров РАО ИСЗФ СО РАН (Радиоастрофизическая обсерватория) и солнечные данные РАТАН-600 (Радиотелескоп Академии наук с рефлекторным зеркалом диаметром 600 м) САО РАН (Специальная астрофизическая обсерватория) позволяют оценить положение источников всплесков радиоизлучения с тонкой временной структурой в широком диапазоне частот. Для этого используются двумерные изображения ССРТ, одномерные данные РАТАН-600 и данные спектрополяриметра диапазона 4–8 ГГц. Поскольку данные РАТАН-600 получаются за счет вращения Земли, на временной профиль всплеска накладывается изменение отклика во времени за счет прохождения его через диаграмму направленности РАТАН-600. С привлечением данных спектрополяриметров полного потока можно скомпенсировать изменения отклика за счет всплеска и получить координату источника этого всплеска. Используя координаты источника, полученные на ССРТ на частоте 5.7 ГГц, и данные РАТАН-600, можно оценить положение источника всплеска в диапазоне частот 4–8 ГГц — диапазоне спектрополяриметра полного потока.

Во время солнечных вспышек в радиодиапазоне наряду с широкополосным, до десятков ГГц, медленно меняющимся континуальным излучением наблюдаются различные транзиентные спектральные особенности, которые характеризуются малыми временами жизни, обычно менее 1 с, и, как правило, относительной полосой менее 5 %. Разнообразие временных и спектральных характеристик тонких структур указывает на различные как механизмы излучения, так и условия выхода излучения из области генерации. Малые времена жизни всплесков в сочетании с узкой полосой частот накладывают жесткие ограничения на размеры, пространственные характеристики и механизмы излучения. Подавляющая часть данных спектральных наблюдений не сопровождается информацией о пространственных характеристиках источников излучения. И хотя временные и спектральные особенности тонких структур изучены достаточно хорошо, знания об источниках этих всплесков по-прежнему малы либо отсутствуют вовсе. Совместный анализ каталога спектрополяриметра 4–8 ГГц и данных РАТАН-600 с марта 2011 по июнь 2013 г. показал, что из 119 событий с тонкой структурой, наблюдавшихся в этот период на спектрополяриметре, только четыре события зарегистрировано на РАТАН-600: 10 Аавгуста 2011, 09:34 UT; 29 июня 2012, 09:13 UT; 14 июля 2012, 07:35 UT и 22 марта 2013, 08:39 UT.

При совместной обработке данных РАТАН-600 и ССРТ использовались данные спектрополяриметра РАО ИСЗФ СО РАН диапазона частот 4–8 ГГц. Спектрополяриметр 4–8 ГГц — 26 канальный модуляционный приемник прямого усиления, работающий в полосе частот 3.8–8.2 ГГц. Осуществляется прием излучения левой и правой круговой поляризации. Спектральные данные получены за счет использования гребенки фильтров с 26 каналами, каждый фильтр-канал отстоит от другого по частоте в среднем на 120 МГц. Полоса пропускаемых частот каждого фильтра не превышает 30 МГц. Временное разрешение сохраняемых данных составляет 10 мс при чувствительности по потоку около 1 с.е.п. Регулярные дневные наблюдения ведутся с августа 2010 г.

Благодаря привлечению данных спектрополяриметра 4–8 ГГц, ССРТ и РАТАН-600 было найдено точное местоположение источников медленно меняющегося всплеска (рис. 202) и всплеска с тонкой временной структурой — дрейфующего всплеска на частоте 5.7 ГГц. На частотах 4.5, 4.7, 4.9, 5.1, 5.3, 5.5 и 6.0 ГГц найдено одномерное положение. Предполагая, что излучение дрейфующих всплесков на разных частотах выходит из разных областей и зная точное положение источника на частоте 5.7 ГГц, была сделана оценка геометрии области генерации всплесков. Комплексный анализ данных показал, что источники хорошо укладываются между вспышечных петель, наблюдаемых в линии 94 Å. Найдено, что область генерации микроволновых дрейфующих всплесков имела максимум излучения по частоте, относительно которого размер эффективно излучающей области уменьшался.

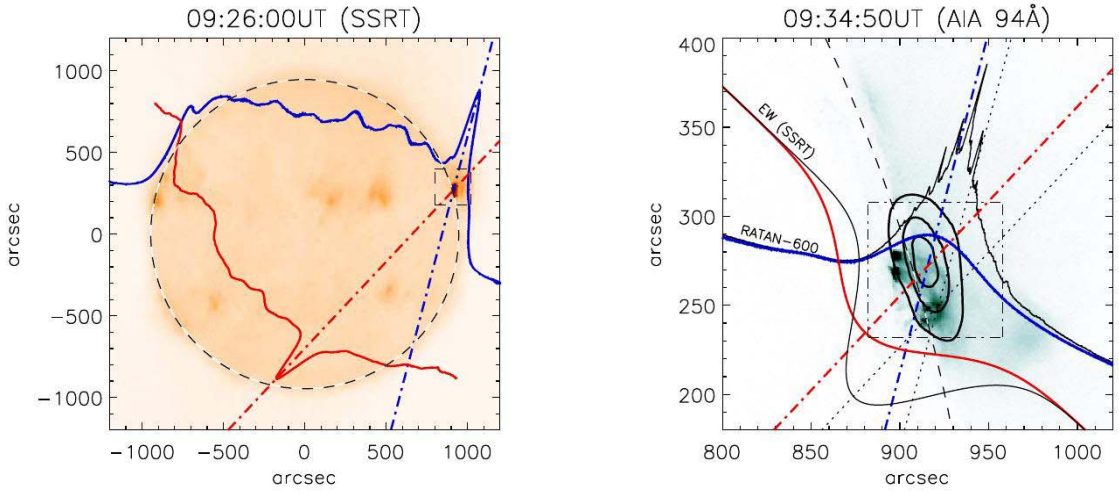


Рис. 202. Положение источника медленно-меняющегося всплеска на солнечном диске (*а*). На 5.7 ГГц одна координата получена по данным ССРТ (красная линия), другая — РАТАН-600 (синяя линия); изображение вспышечной области в линии FeXVIII 94 Å (SDO/AIA), совмещенное со сканами ССРТ и РАТАН-600 (*б*)

4.1.3.4. Обработка данных радиогелиографа: корреляционные кривые

Один из видов данных Сибирского радиогелиографа — это корреляционные кривые (http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php). Такого рода данные гелиографов, ведущих регулярные наблюдения, очень информативны и публикуются наряду с изображениями Солнца. Для примера можно привести данные радиогелиографа в Нобеяма (http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/cor_plot). Корреляционные кривые получают путем суммирования комплексных коэффициентов корреляции, получаемых различными парами антенн. Можно рассматривать каждую точку такой кривой как интеграл по пространственному спектру наблюдаемого объекта. Пределы интегрирования (суммирования) определяются задачей. Для получения динамики только компактных объекто, суммируются значения высоких гармоник пространственного спектра. Для получения максимальной чувствительности суммируется весь спектр. Пример корреляционной кривой Сибирского радиогелиографа показан на рис. 203.

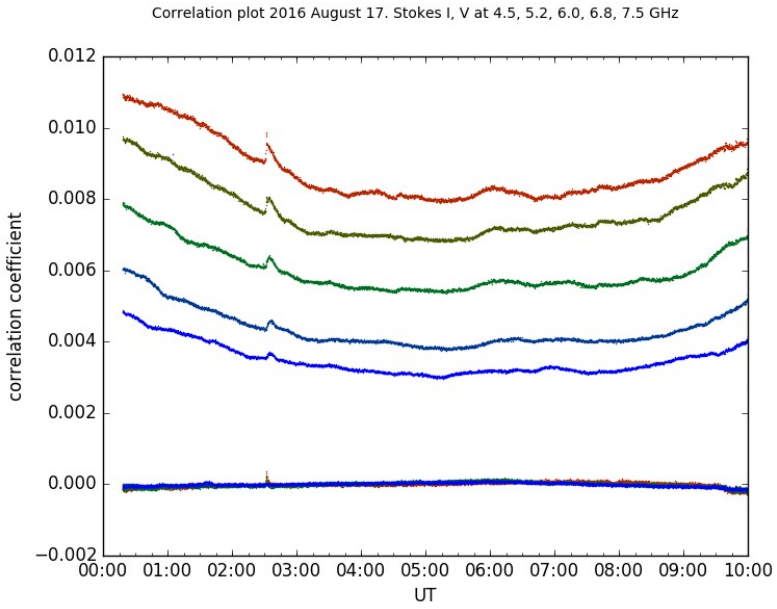


Рис. 203. Пример регулярных данных Сибирского радиогелиографа

4.1.3.5. Развитие базы данных радиогелиографа

База данных радиогелиографа — это прежде всего исходные и обработанные данные. Исходные данные представляют собой файлы формата fits, содержащие комплексные видности, измеренные в заданном диапазоне частот. Обработанные данные — это корреляционные кривые. Эти данные хранятся в двух видах: двоичные в формате fits и картинки, готовые к публикации в формате png. Доступ к fits-файлам возможен по протоколу ftp. По адресу ftp://badary.iszf.irk.ru/data/srh48 находятся исходные данные (в папках с именами, соответствующими дате). В папке lightcurve находятся fits-файлы корреляционных кривых (новый вид данных с 2016 г.). Доступ к базе корреляционных кривых осуществляется через http://badary.iszf.irk.ru/srhDailyImages.php для получения готовых рисунков или через ftp://badary.iszf.irk.ru/data/srh48/lightcurve для доступа к двоичным данным. Файл формата fits содержит две двоичные таблицы (BINTABLE). В одной из них приведены рабочие частоты радиогелиографа, в другой — время, интенсивность и круговая поляризация. Ниже приведен фрагмент кода на Python для доступа к корреляционным кривым.

Доступ к данным спектрополяриметра 4–8 ГГц осуществляется через http://badary.iszf.irk.ru/spectrometer_4_8_query_date.php. По выбранной дате и интервалу времени будут подготовлены данные, и после этого их можно будет скопировать с сайта РАО ИСЗФ СО РАН.

4.1.3.6. Спектрополяриметр 50–500 МГц

Запущенный в работу спектрополяриметр диапазона 50–500 МГц представляет собой супергетеродинный приемник с перестройкой частотных диапазонов и с разбиением каждого диапазона на частотные каналы с шириной полосы пропускания 98 кГц. Общее количество каналов 4608. Время обзора всей полосы частот 1 с. Регистрируются сигналы обеих круговых поляризаций. Спектрополяриметр состоит из логопериодической антенны (рис. 204, *а*), установленной на одном из опорно-поворотных устройств ССРТ, антенного усилителя и приемного блока, содержащего смеситель и синтезатор, используемый в качестве управляемого гетеродина (рис. 204, *б*). Мгновенная полоса частот рабочего диапазона 46 МГц.

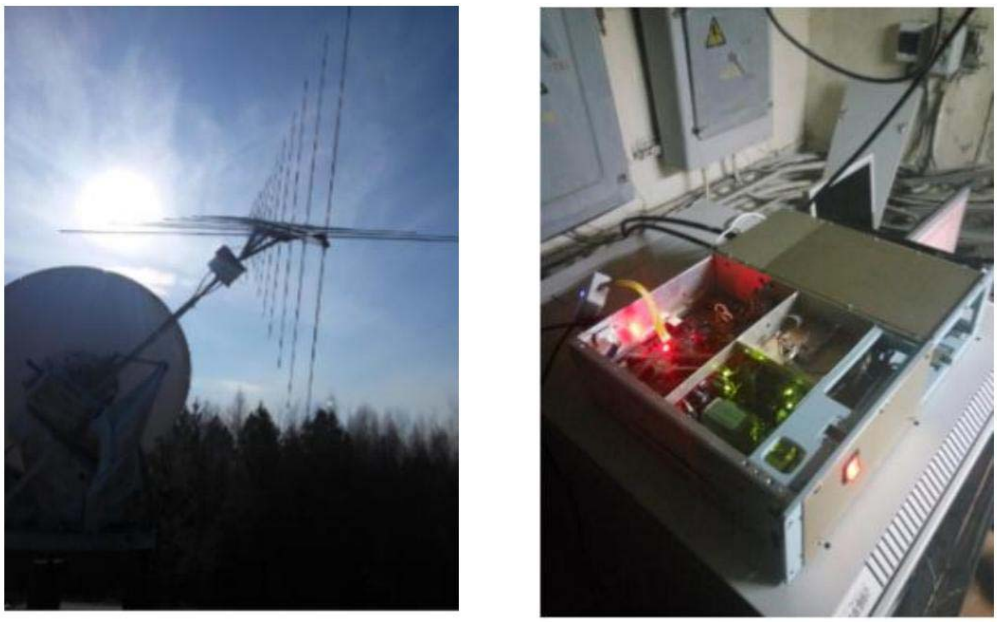


Рис. 204. Спектрополяриметр 50–500 МГц, измеряющий сигналы обеих круговых поляризаций с разбиением сигнала на 4608 частотных каналов: *а* — логопериодическая антенна и усилитель, установленные на одном из опорно-поворотных устройств ССРТ; *б* — приемник спектрополяриметра 50–500 МГц. На заднем плане — цифровая часть приемника

Диапазон промежуточных частот составляет 2–48 МГц. После преобразования в цифровой вид с помощью 100 МГц 12-разрядного АЦП сигнал промежуточной частоты разбивается на частотные каналы путем цифровой фильтрации (FFT по основанию 4). Компоненты Стокса I , V вычисляются для каждого канала через корреляционные функции исходных сигналов двух линейных поляризаций:

$$I = \left\langle E_x E_x^* \right\rangle + \left\langle E_y E_y^* \right\rangle; V = i\left\langle E_x E_y^* \right\rangle - \left\langle E_x^* E_y \right\rangle, \tag{24}$$

где E_x, E_y — сигналы двух ортогональных линейных поляризаций. Накопленные данные попадают в буфер программы под управлением встроенного процессора Nios-II и передаются программе сбора данных (рис. 205).

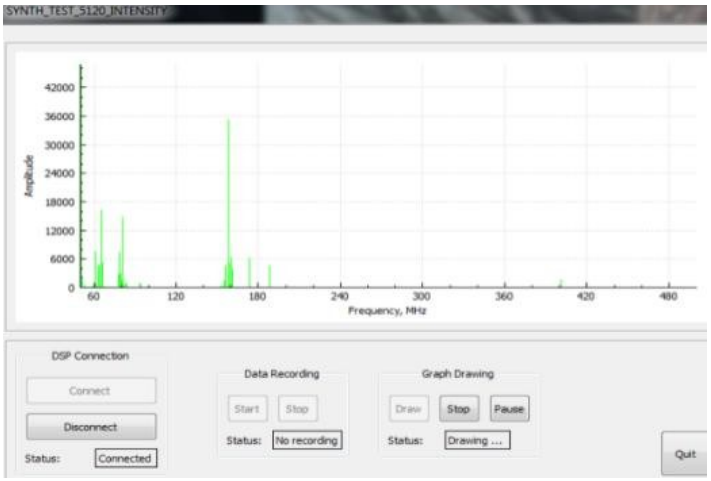


Рис. 205. Программа сбора данных спектрополяриметра 50–500 МГц

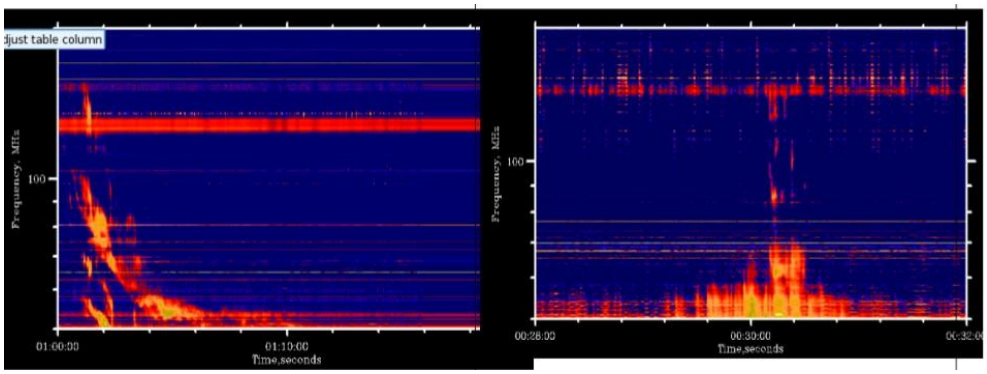


Рис. 206. Динамические спектры всплесков солнечного радиоизлучения, имевших место 10 (слева) и 19 (справа) июля 2016 г.

Данные спектрополяриметра представляют собой так называемые динамические спектры — зависимость спектра мощности от времени. На рис. 206 приведены записи всплесков радиоизлучения Солнца 10 и 19 июля 2016 г. Слева показан вслеска II типа — как правило, такие всплески связаны с выбросами корональной массы — геоэффективными событиями. Основное назначение данных спектрополяриметра 50–500 МГц — это определение параметров подобных выбросов: скорости и плотности корональной плазмы.

Публикации:

Жданов Д.А., Лесовой С.В., Тохчукова С.Х. Источники солнечных микроволновых всплесков III типа // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 12–21. DOI: 10.12737/17341.

4.1.4. Изучение астроклиматических характеристик и проблем улучшения качества изображений при разработке технических предложений для создания крупного солнечного телескопа. Разработка и апробация метода численной оценки интенсивности турбулентности в разных высотных атмосферных слоях по приземным измерениям структурных параметров воздушных течений

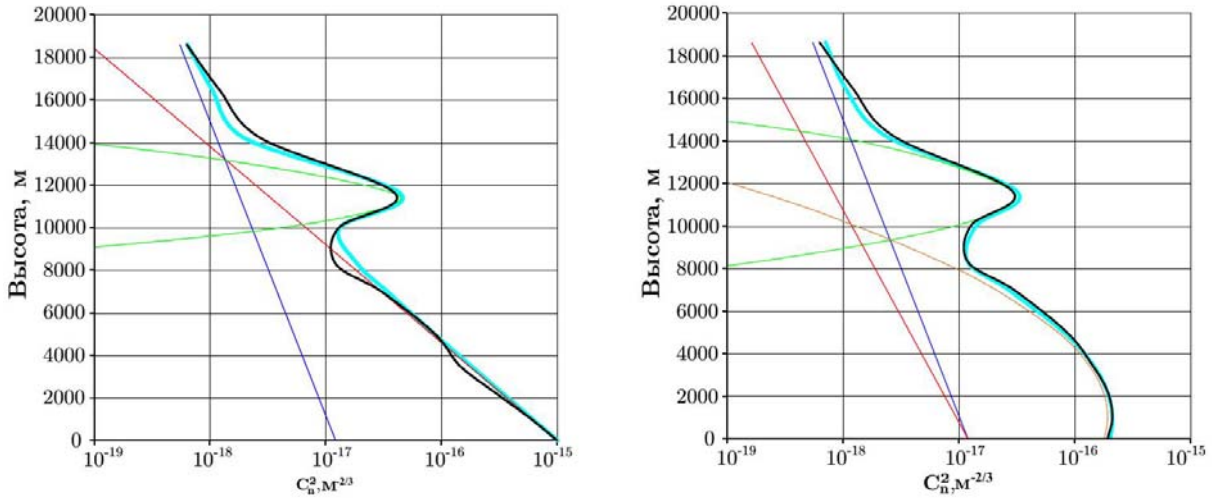
За счет искажений волнового фронта, возникающих в неоднородной по показателю преломления земной атмосфере, изображение Солнца размывается, мелкие структуры становятся неразличимыми. При наблюдениях с помощью телескопов угловой размер различимых деталей в среднем не превышает 1–2″. В то же время современные задачи солнечной физики, связанные с наблюдениями мелкомасштабной структуры, требуют разрешения порядка 0.1″ и лучше.

В задачах, касающихся оптики атмосферы, особый интерес представляет информация о мелкомасштабных турбулентных флуктуациях показателя преломления воздуха и скорости ветра по лучу зрения астрономических телескопов. Флуктуации имеют характерные масштабы менее нескольких десятков метров и временными масштабами менее нескольких минут. Флуктуации показателя преломления воздуха в канале распространения волны, возникающие из-за атмосферной турбулентности, вызывают такие эффекты, как дрожание и мерцание изображений, а наиболее мелкомасштабные — размытие внутренней структуры изображений. Наибольшую интенсивность атмосферной турбулентности можно наблюдать в атмосферном пограничном слое, развивающемся при различной устойчивости.

В режиме реального времени эффективным средством достижения высокого разрешения являются адаптивные оптические системы. Основным параметром оптической атмосферной турбулентности, на основе которого рассчитывается адаптивная оптика (АО), является структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха C_2^n. Численное описание мелкомасштабных процессов именно в атмосферном пограничном слое как в наиболее турбулизированной оптически активной среде отличается высокой сложностью.

Для расчета профиля C_2^n использовались данные архива Реанализ NCAR (National Center for Atmospheric Research). С использованием рядов температуры воздуха на разных изобарических уровнях рассчитаны дисперсии температуры за промежуток времени, соответствующий продолжительности естественного синоптического периода (5–7 сут). На основе известной формы спектра турбулентности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов по дисперсии температуры воздуха были оценены структурные характеристики флуктуаций температуры и показателя преломления воздуха в атмосферном пограничном слое и свободной атмосфере. В низкочастотной части спектр турбулентности аппроскимировался степенной зависимостью $E(f) \sim f^{-3}$, где $E(f)$ — спектральная плотность флуктуаций температуры воздуха, f — частота. В высокочастотном интервале спектр меняет наклон и $E(f) \sim f^{-5/3}$.

На рис. 207, *а*, *б* показаны профили $C_2^n(z)$ и их аппроксимации для ночных и утренних условий. На рис. 207, *а* черной линией обозначен рассчитанный профиль $C_2^n(z)$ для дневных условий. Учитывая свойство аддитивности турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха вдоль луча зрения телескопа, профиль $C_2^n(z)$ предлагается аппроксимировать в виде суммы функций, показанных на рисунке. Голубой линией обозначена результирующая аппроксимации профиля $C_2^n(z)$. Тонкими синей и красной линиями показаны характерные высотные зависимости в верхнем и нижнем атмосферных слоях соответственно. Изменение интенсивности турбулентности в высотном атмосферном слое описывается третьим слагаемым, которое показано зеленой линией.



(а) Дневные условия наблюдений (б) Ночные и утренние условия наблюдений

Рис. 207. Вертикальные профили $C_2^n(z)$ и их аппроксимации: — дневные (*а*), ночные и утренние (*б*) условия наблюдений

Атмосферный слой с высокой интенсивностью турбулентности формируется на высоте около 12 км и связан с сильными сдвигами скорости ветра в струйном течении. Конкретно для дневных условий при описании изменений показателя преломления воздуха с высотой профиль $C_2^n(z)$ предлагается представить в виде

$$C_n^2(z) = C_n^2(z_*)\exp\left(-\frac{z}{2000}\right) + C_{n1}^2\exp\left(-\frac{z}{6000}\right) + C_{n2}^2\exp\left(-\left(\frac{z-z_c}{h_c}\right)^2\right), \qquad (25)$$

где z — высота в м, $C_n^2(z_*)$ — приземное значение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха, C_{n1}^2 — значение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в точке минимума под атмосферным турбулентным слоем (в данном случае на высоте 9000 м), C_{n2}^2 — наибольшее значение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в атмосферном турбулентном слое, z_c — высота расположения атмосферного слоя, h_c — толщина атмосферного слоя. Рассчитанные спектральным методом фоновые значения: $C_n^2(z_*) = 10^{-15}$ м$^{-2/3}$, $C_{n1}^2 = 1.22\cdot10^{-17}$ м$^{-2/3}$, $C_{n2}^2 = 4\cdot10^{-17}$ м$^{-2/3}$, $z_c = 11500$ м, $h_c = 1000$ м.

Для ночных и утренних условий, когда турбулентность в атмосферном пограничном слое подавлена, вертикальный профиль $C_n^2(z)$ предлагается аппроксимировать следующим соотношением:

$$C_n^2(z) = C_n^2(z_*)\exp\left(-\left(\frac{z-h_{c0}}{16000}\right)^2\right) + C_{n1}^2\exp\left(-\frac{z}{4500}\right) + C_{n1}^2\exp\left(-\frac{z}{6000}\right) + C_{n2}^2\exp\left(-\left(\frac{(z-z_c)^2}{2h_c}\right)\right)$$

(26)

В (26) высота нижнего слоя атмосферы обозначена h_{c0}. На рис. 207, *б* черной линией обозначен рассчитанный профиль $C_n^2(z)$, голубой линией — сумма функций, аппроксимирующих рассчитанный профиль C_n^2. Второе и третье слагаемые приведенного соотношения отражают функциональные зависимости структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в нижнем и верхнем атмосферных слоях и соответственно показаны красной и синей линиями. Атмосферные слои на высотах 1 и 12 км с высокой

интенсивностью турбулентности, описываемые первым и последним слагаемыми, показаны коричневой и зеленой линиями соответственно.

Полученные выражения дают возможность численно оценивать интегральную интенсивность оптической турбулентности и интенсивность турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха в разных высотных атмосферных слоях по приземным измерениям структурных параметров воздушных течений.

С целью верификации метода численной оценки интенсивности турбулентности в разных высотных атмосферных слоях по приземным измерениям структурных параметров воздушных течений были выполнены серии наблюдений на БСВТ с использованием ДВФ типа Шака–Гартмана, сопряженного с плоскостью апертуры телескопа. В качестве объектов использовались изображения солнечной фотосферы, имеющие высокий контраст: солнечные пятна и поры, а также изображения Луны. ДВФ Шака–Гартмана работал на длине волны излучения 5350 Å. Регистрация гартманограмм проводилась с высокой частотой 300 кадр/с.

По данным измерений волнового фронта на основе разности локальных наклонов дифференциальным способом были оценены дисперсии дрожания изображений на разнесенных в плоскости входного зрачка телескопа субапертурах. Применение дифференциального метода измерений позволило уменьшить ошибку определения дрожания, связанную с вибрацией элементов конструкции телескопа. Радиус когерентности из оптических измерений оценивался по следующему соотношению:

$$r_0 = 0.528\sigma_\alpha^{-3/5}\lambda^{6/5}D^{-1/5}\left(1-0.562\left(\frac{d}{D_\mathrm{s}}\right)^{-1/3}\right)^{3/5}. \qquad (27)$$

Здесь D_s — размер субапертуры, d — расстояние между центрами субапертур. Синхронно с ДВФ проводились микрометеорологические измерения турбулентных характеристик атмосферы с помощью малоинерционных автоматических метеорологических комплексов на двух уровнях: на верхней площадке вблизи основания колонны телескопа и вблизи зеркала-сидеростата. Микрометеорологические наблюдения дают возможность оценить условия формирования турбулентности и определить амплитудно-частотные характеритики турбулентности в нижнем (приземном) слое атмосферы, а также сравнить расчетные и модельные характеристики с измеренными. На основе совместного анализа синхронных данных был уточнен расчетный метод турбулентных характеристик на разных высотах. В качестве исходной информации для расчетов в методе использовались двухуровенные данные измерений флуктуаций температуры воздуха и скорости ветра на площадке БСВТ, а также текущие архивные данные реанализа. Из микрометеорологических измерений радиус когерентности оценивался по соотношению

$$r_0 = \left(0.423\sec(\alpha)k^2\int_0^H C_n^2(z)dz\right)^{-3/5}, \qquad (28)$$

где k — волновое число, α — зенитный угол, H — высота оптически активной атмосферы (~20 км). Для определения величины радиуса когерентности по измеренным приземным значениям использованы полученные аппроксимации профиля $C_n^2(z)$. Из общего объема наблюдений качества солнечных изображений с помощью ДВФ были отобраны реализации, не обремененные внешними помехами (дымкой, высотной слабой облачностью, сильными порывами ветра, большими зенитными расстояниями). По результатам специальных наблюдений на БСВТ с 13 по 14.10.2016 г. средняя максимальная величина параметра Фрида в дневное время составила около 6 см. Для сравнения дневных условий с ночными, когда конвекция в приземном слое подавлена, параметр Фрида рассчитывался аналогичным образом по качеству лунных изображений. Радиус когерентности, оцененный по дрожанию изображений лунной поверхности, незначительно отличается от радиуса

когерентности, оцененного по дрожанию солнечных субизображений, в пределах 1 см. Во время наблюдений расчетные значения r_0 изменялись в диапазоне от 4.4 до 10.5 см. Лучшее качество изображения достигалось между 13:00 и 14:40 LT, что связано со стабилизирующим влиянием оз. Байкал, оказываемым на атмосферные течения. Вариации параметра Фрида с периодом 7 с достигали 3.1 см.

Разработанный метод позволяет численно оценивать интенсивность турбулентности в разных высотных атмосферных слоях по приземным измерениям структурных параметров воздушных течений для дневных и ночных условий наблюдений с учетом динамики турбулентности в течение суток. Данные об оптико-микрометеорологическом режиме на БСВТ в дальнейшем будут использованы в задачах, связанных с развитием инструментальной базы БАО ИСЗФ СО РАН. Результаты послужат методической основой при совершенствовании методов и походов, применяемых для адаптации волнового фронта и разработки новых конфигураций адаптивных оптических систем, требующих знания динамических характеристик самой атмосферы.

Публикации:

1. Antoshkin L.V. et al. Adaptive system for solar telescopes operating in the strongly turbulent atmosphere // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. V. 9909. July 2016. P. 990932. (Proc. SPIE). DOI: 10.1117/12.2231936.

2. Kopylov E.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Y. The study of variability of the atmospheric turbulence in the region Lake Baikal // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. V. 9909. July 2016. 99093S. (Proc. SPIE). DOI: 10.1117/12.2231940.

3. Шиховцев А.Ю. Исследование оптической нестабильности земной атмосферы и условий коррекции солнечных изображений: дис. канд. физ.-мат. наук, 01.03.03; защищена 19.04.16, утв. 26.09.16. Иркутск, 2016. 171 с. 006646720.

4.1.5. Программное обеспечение для приема и анализа сообщений о гамма-всплесках, оповещения оператора-наблюдателя о произошедшем событии

Основной современный метод изучения космических гамма-всплесков заключается в первоначальном обнаружении гамма-излучения с помощью широкоугольного гамма-телескопа, расположенного на космическом аппарате, и последующем наблюдении этой точки неба с помощью других космических и наземных телескопов в различных диапазонах электромагнитного спектра. Как правило, излучение всех видов довольно быстро затухает (за время порядка нескольких часов или дней), поэтому важным фактором является быстрота проведения наблюдений. В связи с этим при наземных наблюдениях широко используются телескопы-роботы, задача которых — регистрация оптического излучения видимого и ИК-диапазонов в первые секунды всплеска, когда происходит самое интересное. Существует сеть автоматической рассылки сообщений об этих событиях — Gamma-Ray Communication Network (GCN). Источниками сообщений в этой сети являются упомянутые космические гамма-телескопы, такие как Swift, Integral, Fermi и др., а получателями — наземные наблюдательные средства различных типов — оптические телескопы, радиотелескопы и т. д. GCN поддерживает несколько способов доставки сообщений: SMS-сообщения, электронная почта, прямое интернет-подключение к серверу GCN. Последний способ обеспечивает наиболее быструю доставку данных и используется при автоматическом наведении телескопов-роботов.

С 2007 г. на телескопе АЗТ-33 ИК выполняются наблюдения послесвечений гамма-всплесков в оптическом диапазоне. Результаты этих наблюдений, несомненно, имеют научную ценность, однако типичное время реакции на гамма-всплеск (интервал времени между самим всплеском и началом наблюдений на телескопе) составляет более 15 мин.

Таким образом, самая ценная научная информация о первых минутах события оказывается упущенной. Например, автоматизированный телескоп P60 такого же диаметра (обсерватория Maunt Palomar) имеет время реакции меньше 3 мин. Для уменьшения времени реакции необходимо среди прочего обеспечить решение следующих задач:

• непрерывное подключение через интернет к сети GCN, прием поступающих оповещений в режиме реального времени;

• автоматический анализ оповещений с целью определения возможности наблюдения гамма-всплеска на телескопе;

• оповещение оператора-наблюдателя о произошедшем событии.

На рис. 208 показан выбранный вариант решения указанных задач. В GCN существует сервер рассылки сообщений по протоколу VOEvent (http://en.wikipedia.org/wiki/VOEvent). В качестве сервиса приема таких сообщений используется свободное ПО Comet (http://comet.readthedocs.org), являющееся реализацией брокера VOEvent Transport Protocol на языке Python. При получении сообщения сервис Comet вызывает программу-обработчика, передавая ей текст сообщения. Сообщения VOEvent представляют собой структуры в формате XML.

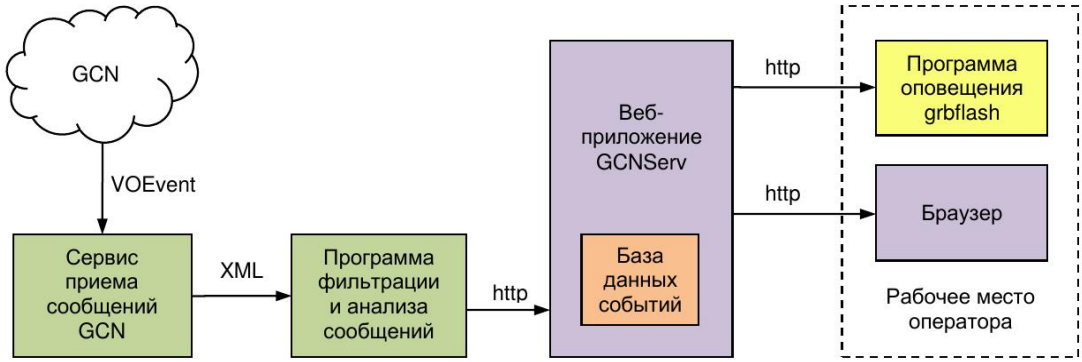


Рис. 208. Компоненты системы обработки сообщений

Обработчик выполняет фильтрацию и анализ сообщений, отбирая среди них те, которые касаются новых гамма-всплесков (в настоящее время отбираются сообщения с инструментов BAT и XRT спутника Swift). Такие сообщения содержат момент времени, координаты источника и различные дополнительные данные. Эта информация направляется веб-приложению GCNServ и сохраняется в его базе данных. Она может быть получена клиентскими программами при помощи запросов по протоколу HTTP.

Для оповещения наблюдателя на рабочем месте используется программа grbflash в фоновом режиме. Она периодически обращается к веб-приложению GCNServ и проверяет наличие новых событий. При обнаружении события программа отображает сообщение (рис. 209), содержащее ссылку для доступа к веб-интерфейсу GCNServ (рис. 210).

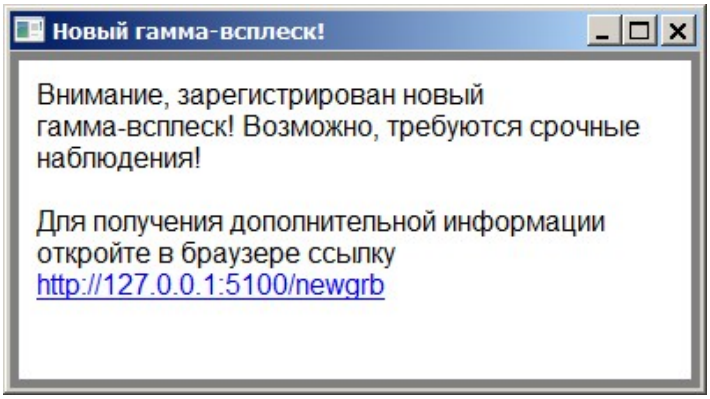


Рис. 209. Окно программы оповещения grbflash

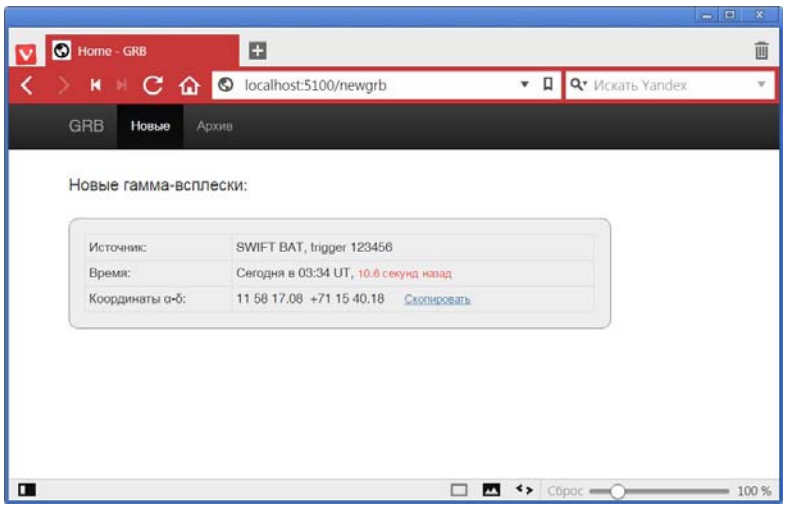


Рис. 210. Окно браузера с веб-интерфейсом GCNServ

Веб-интерфейс позволяет просмотреть основные сведения о произошедшем событии, в том числе время события и его координаты, после чего наблюдатель может принять решение о необходимости наблюдений. Для быстрого копирования координат объекта в буфер обмена предусмотрена ссылка «Копировать».

Публикации:

Pasquale M.De et al. The central engine of GRB 130831 Å and the energy breakdown of a relativistic explosion // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2016. Jan. V. 455. P. 1027–1042. DOI: 10.1093/mnras/stv2280. arXiv:1509.09234

4.2. Фотометрические наблюдения и исследования нестационарных астрофизических объектов на телескопе АЗТ-33ИК

4.2.1. Оснащение телескопа АЗТ-33ИК спектрометрической и фотометрической аппаратурой

В конце 2015 г. телескоп АЗТ-33ИК был оснащен новой спектрометрической аппаратурой (спектрометр среднего и низкого разрешения АДАМ) с целью подготовки к использованию телескопа в качестве составной части наземного научного комплекса космической обсерватории «Спектр-РГ». Основные идеи и научные задачи с использованием прибора прибора были сформулированы в ИКИ РАН, прибор был разработан и изготовлен в Специальной астрофизической обсерватории РАН. Спектрометр установлен в кассегреновском фокусе телескопа и имеет оптическую схему, приведенную на рис. 211. В качестве приемника используется ПЗС-камера «Andor Newton-920» с эффективностью 90 % в диапазоне от 4000 до 8500 Å. Квантовая эффективность всей системы (оптика телескопа и спектрографа, решетки и ПЗС-камера) достигает 50 %. Подробное описание спектрометра можно найти в работе Афанасьева и др. [1].

В 2016 г. для наблюдений в диапазоне 0.9–1.7 мкм на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН установлена инфракрасная камера «Xeva-1.7-320» с матричным InGaAs детектором, охлаждаемым до 223 К. Отлажен драйвер ПЗС-камеры, осуществляющий ее программную поддержку в распределенной системе управления ПЗС-камерами Саянской солнечной обсерватории. Разработан программный модуль управления камерой ближнего ИК-диапазона и отработана методика инфракрасных наблюдений с использованием матричного фотоприемного устройства. Начаты мониторинговые наблюдения микроквазара Cyg X-1 в полосах J, H с указанной камерой.

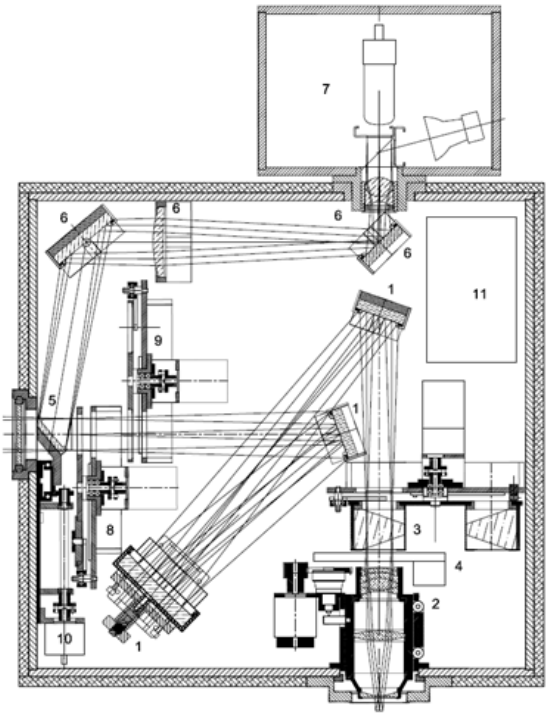


Рис. 211. Оптико-механическая схема спектрометра АДАМ: 1 — коллиматор, 2 — камера, 3 — турель дифракционных решеток, 4 — затвор, 5 — зеркало узла калибровки, 6 — проектор узла калибровки, 7 — узел калибровочных ламп, 8 — турель щелей, 9 — турель фильтров, 10 — механизм ввода/выводы зеркала калибровки, 11 — управляющий компьютер

4.2.2. Результаты наблюдений

После установки спектрометра на телескопе проведены спектроскопические наблюдения скоплений галактик, активных ядер галактик, квазаров, катаклизмических переменных [2, 3]. В текущем году получены спектры около 20 объектов из выборки рентгеновских квазаров и кандидатов в квазары. Результаты пробных спектрометрических наблюдений различных астрофизических объектов позволяют сделать вывод о том, что существенная часть оптических наблюдений по программе наземной оптической поддержки обзора всего неба обсерватории «Спектр-РГ» может быть обеспечена на телескопе АЗТ-33ИК. Открыт один из наиболее далеких ($z = 5.08$) оптически ярких квазаров, обнаруженных в рентгеновских обзорах, его спектр показан на рис. 212.

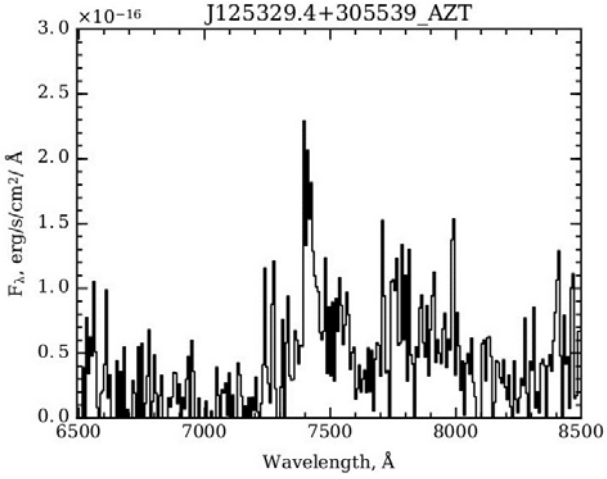


Рис. 212. Спектр квазара 3XMM J125329+305539 на красном смещении 5.08, измеренный спектрографом АДАМ

Выполнялись наблюдения площадок GRB в режиме follow-up, т. е. сопровождение ранее открытых GRB (информация распространяется через сеть рассылки оповещений GCN). Целью наблюдений является фотометрия источника — оптического транзиента (ОТ) для построения кривой блеска. Время, в течение которого ОТ доступен для наблюдений, может составлять от нескольких часов до нескольких суток, поэтому задача построения полной кривой блеска может быть решена только силами нескольких телескопов, рассредоточенных по долготе. Каждый отдельный телескоп может внести в общую кривую только несколько точек (рис. 213).

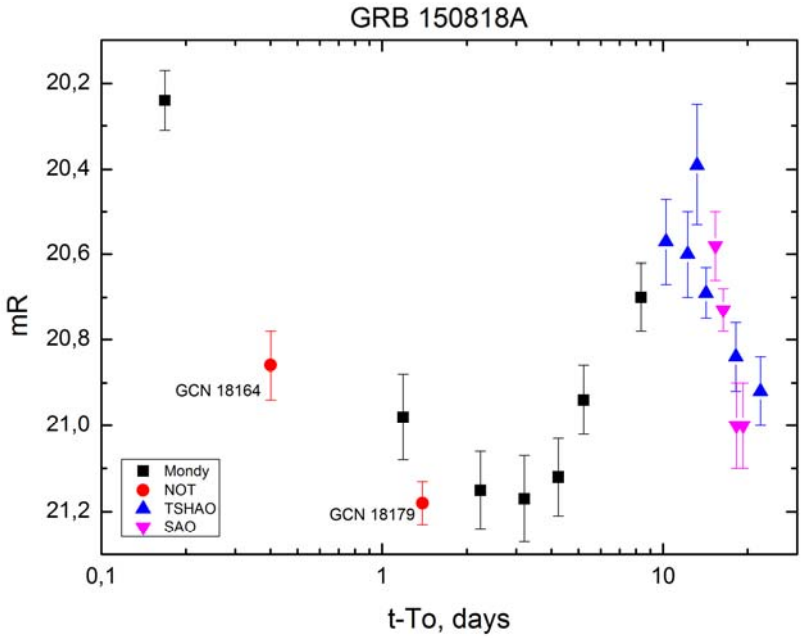


Рис. 213. Кривая блеска GRB 150818 Å, черными квадратами обозначены точки, полученные на телескопе АЗТ-33ИК [4, 5]

Площадки GRB, наблюдавшиеся в 2016 г.: 160131A, 160228A, 160313A, 160314A, 160327A, 160525B, 160601A, 160623A, 160629A, 160910A, 160912A, 160917A, 160925A, 161007A. По результатам наблюдений в 2016 г. были выпущены циркуляры GCN: 18971, 18991, 19120, 19195, 19201, 19241, 19470, 19483, 19490, 19561, 19670, 19919, 19920, 19929, 19936, 19947, 20018. Продолжены мониторинговые фотометрические измерения оптического излучения микроквазара Cyg X-1 и квазара 3C273 в полосах BVRI на телескопе АЗТ-33ИК. Данные по Cyg X-1 дополнены измерениями в ближнем инфракрасном диапазоне в полосах JH.

Публикации:

1. Kiehlmann S., Savolainen T., Jorstad S.G., Sokolovsky K.V., Schinzel F.K., Marscher A.P., Larionov V.M., Agudo I., Akitaya H., Benítez E., Berdyugin A., Blinov D.A., Bochkarev N.G., Borman G.A., Burenkov A.N., Casadio C., Doroshenko V.T., Efimova N.V., Fukazawa Y., Gómez J.L., Grishina T.S., Hagen-Thorn V.A., Heidt J., Hiriart D., Itoh R., Joshi M., Kawabata K.S., Kimeridze G.N., Kopatskaya E.N., Korobtsev I.V., Krajci T., Kurtanidze O.M., Kurtanidze S.O., Larionova E.G., Larionova L.V., Lindfors E., López J.M., McHardy I.M., Molina S.N., Moritani Y., Morozova D.A., Nazarov S.V., Nikolashvili M.G., Nilsson K., Pulatova N.G., Reinthal R., Sadun A., Sasada M., Savchenko S.S., Sergeev S.G., Sigua L.A., Smith P.S., Sorcia M., Spiridonova O.I., Takaki K., Takalo L.O., Taylor B., Troitsky I.S., Uemura M., Ugolkova L.S., Ui T., Yoshida M., Zensus J.A., Zhdanova V.E. Polarization angle swings in blazars: The case of 3C 279 // Astron. Astrophys. 2016. V. 590. id. A10. P. 1–20. DOI: 10.1051/0004-6361/201527725. https://arxiv.org/pdf/1603.00249v2.pdf.

Список используемых источников:

1.Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В. Спектрограф низкого и среднего разрешения АДАМ для 1.6-м телескопа АЗТ-33ИК // Астрофизический бюллетень. 2016. Т. 71, № 4. С. 514–524.

2. Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С., Лутовинов А.А., Ревнивцев М.Г., Сазонов С.Ю., Ткаченко А.Ю., Хорунжев Г.А., Яскович А.Л., Павлинский М.Н. Наблюдательные возможности нового спектрографа среднего и низкого разрешения на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории // Письма в АЖ: Астрономия и космическая астрофизика. 2016. Т. 42, № 5. С. 333–345.

3. Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г., Ткаченко А.Ю., Воробьев В.С., Семена А.Н., Мещеряков А.В., Додонов С.Н., Еселевич М.В., Павлинский М.Н. Выборка катаклизмических переменных, обнаруженных в рентгеновском обзоре площадью 400 кв. градусов // Письма в АЖ: Астрономия и космическая астрофизика. 2016. Т. 42, № 4. С. 273.

4. Mazaeva E., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I., Pozanenko A. GRB 150818A: possible SN rise in light curve of Mondy observations // GRB Coordinates Network. Circular Service. 2015. № 18205.

5. De Ugarte Postigo A., Cano Z., Perley D. A., Schulze S., Xu D., Sanchez-Ramirez R., Malesani D., Lombardi G., Garcia A., Scarpa R. GRB 150818A: Spectroscopic confirmation of the SN from GTC // GRB Coordinates Network. Circular Service. 2015. № 18213.

4.3. Методы диагностики процессов солнечной активности и ее проявлений в ММП, магнитосфере и ионосфере Земли

4.3.1. Диагностика солнечных факторов возмущений космической погоды

В 2016 г. начаты регулярные наблюдения на первой очереди многоволнового Сибирского радиогелиографа. Многоволновый Сибирский радиогелиограф имеет Т-образную конфигурацию антенн и работает в диапазоне частот 4–8 ГГц. Частоты наблюдений с мгновенной полосой 10 МГц задаются протоколом наблюдений. Сигналы антенн, переданные по оптоволокну, обрабатываются цифровыми приемниками. После обработки данные передаются к коррелятору через высокоскоростной последовательный интерфейс. Пространственное разрешение 48-антенной решетки менее угловой минуты, время переключения частоты менее секунды. Чувствительность по яркостной температуре конфигурации множества с 48 антеннами — приблизительно 100 K. Тестовые наблюдения показали, что чувствительность радиогелиографа достаточна для обнаружения источников с потоком менее одной десятитысячной от излучения спокойного Солнца как целого. Данные наблюдений радиогелиографа дополняются наблюдениями на спектрополяриметрах интегрального потока с общим диапазоном от 50 МГц до 24 ГГц. Данные доступны на http://badary.iszf.irk.ru/ [1, 2, 4].

Новые возможности многоволнового радиогелиографа позволяют получать изображения с высоким временным разрешением и локализовывать структуры, наблюдаемые в микроволновом диапазоне. С использованием многоволновых данных Сибирского радиогелиографа и спектральных наблюдений широкополосного микроволнового спектрополяриметра 4–8 ГГц были исследованы вспышки, которые произошли в марте–апреле 2016 г. Качественный и количественный анализ событий был выполнен с использованием микроволновых и рентгеновских наблюдений [2].

Микроволновые наблюдения позволяют изучать энерговыделение в плазме в области вспышки. Анализ данных от РАТАН-600, спектрополяриметра на 4–8 ГГц и ССРТ одновременно с данными EUV позволил локализовать источник микроволнового всплеска III типа 10 августа 2011 г. во всей полосе частот возникновения всплеска, а также определить самую вероятную область выделения первичной энергии. Чтобы локализовать источники всплесков III типа по данным РАТАН-600, был использован оригинальный метод

обработки данных. На частоте 5.7 ГГц источник взрывов был определен вдоль двух координат, тогда как на частотах 4.5, 4.7, 4.9, 5.1, 5.3, 5.5, 6.0 ГГц их расположение источника было идентифицировано вдоль одной координаты. Было найдено, что размер источника всплеска на 5.1 ГГц был максимален по сравнению с другими частотами [4].

Начаты регулярные наблюдения на первом из трех Солнечных телескопов оперативных прогнозов (СТОП), разработанных и изготовленных в ИСЗФ СО РАН, данные которых позволяют измерять распределение магнитного поля по диску Солнца, находить области с открытыми линиями магнитного поля, прогнозировать скорость стационарного солнечного ветра, рассчитывать магнитное поле на поверхности источника [3]. Сеть состоит из трех магнитографов, расположенных в Уссурийской астрофизической обсерватории, Байкальской астрофизической обсерватории и Кисловодской горной астрономической станции. Данные используются для моделирования крупномасштабной магнитной топологии солнечной короны и моделирования космической погоды. Преимущество магнитографов СТОП по сравнению с другими инструментами (например, магнитографом в Уилкокской солнечной обсерватории) является возможностью проводить наблюдения во многих спектральных линиях одновременно. Это позволяет решать новые задачи, связанные с интерпретацией измерений магнитных измерений спокойного Солнца.

4.3.2. Диагностика возмущений магнитосферы и ионосферы Земли

Разработанная методика расчета токовых систем в полярной шапке Земли позволила обнаружить и объяснить эффекты насыщения магнитного потока и сжимаемости магнитопаузы во время мощных суббурь. Выявлена важная роль набегающего давления в потоке солнечного ветра. В дополнение к известному эффекту межпланетного электрического (E_{sw}) и южной компоненты межпланетного магнитного поля B_z было найдено, что насыщение зависит также от давления солнечного ветра P_d. С помощью метода инверсных магнитограмм и глобальной МГД числового кусочного параболического метода была исследована зависимость расстояния магнитопаузы от давления и величины южного магнитного поля. В исследованных суперштормах и P_d и B_z достигают максимальных значений. Было показано, что темп сжатия магнитосферы дневной стороны уменьшается с увеличивающимся P_d и движущимся B_z, приближаясь к очень маленьким значениям $P_d \geq 15$ нПа и $B_z \leq -40$ нТл. Эта зависимость предполагает, что конечная сжимаемость магнитосферы управляет величиной суперштормов [5].

С помощью нового декаметрового Екатеринбургского когерентного радара получены первые результаты о природе дрейфующих волн сжатия в ионосфере Земли на средних широтах. Проанализированы магнитосферные пульсации Pc5, зарегистрированные в ночной среднеширотной магнитосфере. Зарегистрированные быстрые изменения электрического дрейфа ионосферной плазмы были вызваны низкочастотными волнами в магнитосфере. Движущиеся на запад волны совпадают с направлением магнитного дрейфа протонов. Вейвлет-анализ показывает, что частота колебаний зависит от волнового числа m и корреляция между ними составляет 0.90. Увеличение частоты от 2.5 до 5 МГц сопровождалось увеличением абсолютного значения m от 20 до 80. Такие особенности волны свидетельствуют о том, что это должно быть классифицировано как дрейф сжатия, условия существования которого — конечное давление плазмы и ее неоднородность вдоль магнитной особенности [6].

Публикации:

1. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V., Grechnev V.V., Zhdanov D.A., Kochanov A.A., Meshalkina N.S., Kashapova L.K. The Siberian Radioheliograph: first observations // 5th RadioSun Workshop and Summer School. May 23–27, 2016, České Budějovice, Czech Republic.

2. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Grechnev V.V., Gubin A.V., Kashapova L.K., Kochanov A.A., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Zhdanov D.A. The first results of the flare observations by the Siberian Multiwave Radioheliograph // 15th RHESSI Workshop. July 26–30, 2016, Graz, Austria.

3. Pevtsov A.A., Nagovitsyn Yu.A., Tlatov A.G., Demidov M.L. Solar physics research in the Russian subcontinent – current status and future // Asian J. of Phys. 2016. V. 25, N 3.

4. Zhdanov D., Lesovoi S., Tokhchukova S. Sources of type III solar microwave bursts // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, iss. 2. P. 15–27.

5. Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Yu., Han J.P., Wang C. Saturation of superstorms and finite compressibility of the magnetosphere: results of the magnetogram inversion technique and global PPMLR-MHD model // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43, iss. 13. P. 6734–6741.

6. Челпанов М.А., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Бернгардт О.И., Магер О.В. Наблюдения дрейфово-компрессионных волн с помощью среднеширотного декаметрового когерентного радара // Солнечно-земная физика. 2016. V. 2, № 2. P. 46–56.

Список использованных источников:

1. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph // Res. Astron. Astrophys. 2014. V. 14, iss. 7. Article id. P. 864–868.

2. Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary broadband microwave spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope // Solar Phys. 2015. V. 290, iss. 1. P. 287–294.

Bogod V.M. RATAN-600 radio telescope in the 24th solar-activity cycle // Astrophys. Bull. 2011. V. 66, iss. 2. P. 190–204.

5. РАБОТА ОБСЕРВАТОРИЙ ИСЗФ СО РАН

5.1. Байкальская астрофизическая обсерватория

Байкальская астрофизическая обсерватория (БАО) расположена в п. Листвянка в 70 км от Иркутска. Основным инструментом БАО является единственный в России Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ), входящий в перечень уникальных установок Российской Федерации (рег. номер 01-29). Кроме того, БАО оснащена тремя хромосферными телескопами, оборудованными интерференционно-поляризационными фильтрами (ИПФ) на диагностически важные линии Hα (λ 656.3 нм) и K CaII (λ 393.4 нм).

Основные задачи БАО — мониторинг солнечной активности и проблемно-ориентированные спектральные, спектрополяриметрические и фильтровые наблюдения нестационарных процессов в солнечной атмосфере с целью исследования механизмов их возникновения.

Наблюдения на инструментах обсерватории обеспечивали основные экспериментальные данные для решения научных задач, поставленных в проектах Программы фундаментальных исследований СО РАН, проектах РФФИ и РНФ.

Основная программа наблюдений на БСВТ в 2016 г. включала спектрополяриметрические наблюдения и регистрацию в белом свете активных областей (в том числе пор) с целью изучения эволюции этих образований с высоким пространственным и спектральным разрешением в широком волновом диапазоне.

На БСВТ проведены спектрополяриметрические наблюдения активных образований на Солнце в линиях железа 5250 Å и в интервале длин волн 4938–4946 Å с одновременными снимками в белом свете групп солнечных пятен. Период наблюдений —

с июля до октября 2016 г. Объем наблюдательного материала составил около 1 ГБ.

Выполнены регулярные наблюдения хромосферы Солнца (полный диск) в линии K CaII 393.4 нм. В течение 70 дней наблюдений получено 630 изображений. Изображения в стандартизованной форме опубликованы на сайте Института. Выполнены квазирегулярные наблюдения хромосферы Солнца (полный диск) в линии Hα 656.3 нм. В течение 48 дней получено 19 400 изображений.

Разработана и изготовлена новая система лайншифтера Hα-фильтра, и отлажено программное управление полосой фильтра. Использование системы управления полосой фильтра расширяет функциональные возможности наблюдений на телескопе.

Пример изображения диска Солнца в линии Hα показан на рис. 214.

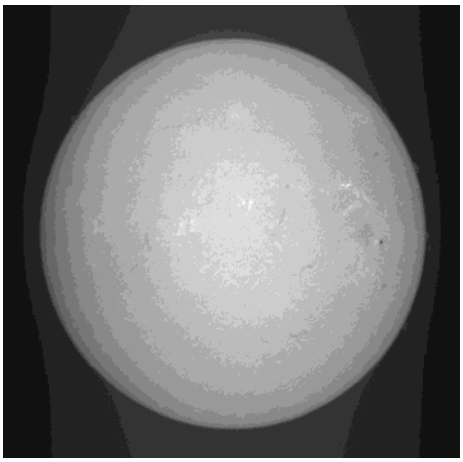


Рис. 214. Изображение в центре линии Hα, полученное 20 июня 2016 г. с помощью хромосферного телескопа БАО ИСЗФ

Продолжена работа по созданию архива наблюдательных данных БАО на электронных носителях.

В обсерватории выполняли экспериментальные работы также другие институты Сибирского отделения РАН: Институт оптики атмосферы (Томск), Институт земной коры (Иркутск), Лимнологический институт (Иркутск).

В 2016 г. в Байкальской астрофизической обсерватории проходили практику студенты Иркутского государственного университета (ИГУ) и Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ). Регулярно проводились экскурсии для школьников, студентов и населения Иркутской области.

Штат постоянного обслуживающего персонала обсерватории состоит из 18 человек. При выполнении специальных и рутинных программ наблюдений группа научных сотрудников, аспирантов и инженеров составляет от 10 до 3 человек, включая дежурных наблюдателей.

5.2. Саянская солнечная обсерватория

Саянская солнечная обсерватория (ССО) расположена на расстоянии около 300 км от Иркутска в Республике Бурятия.

Обсерватория является основной экспериментальной базой для выполнения программ наблюдений по солнечной физике, солнечно-земной физике и контролю космического пространства. Наблюдения ведутся: на станциях космических лучей круглосуточно, на

солнечных оптических телескопах — в светлое время суток, на звездных оптических телескопах за астрофизическими объектами, космическими аппаратами и космическим мусором — в темное время суток.

В 2016 г. выполнены следующие программы наблюдений и экспериментальные работы:

1. На автоматизированном солнечном телескопе (АСТ) выполнен большой объем программ проблемно-ориентированных наблюдений. Целью программ наблюдений являлось получение экспериментальных данных для выполнения исследований структуры и динамики различных образований в солнечной атмосфере, колебаний и волн в фотосфере и хромосфере Солнца методами спектрополяриметрии.

Таблица 9. Наблюдения на АСТ в 2016 г.

		май	июнь	июль	авг.	сент.	итого
Пятно	HeI 10830 Å + SiI 10827 Å				3		33c+16
	Hα 6563 Å+ HeI 10830 Å + Si I 10827 Å	4	3	1	4		
	Hα 6563 Å			1			
	BaII 4554 Å	1c		2c		1c	
	FeI 5250 Å	3c				4c	
	FeI 6301 Å, 6302 Å	4c		7c		11c	
Факел	Hα 6563 Å + HeI 10830 Å + SiI 10827 Å	8	3	4	6		27
	HeI 10830 Å + SiI 10827 Å				3		
	CaII (3934 Å, 3968 Å, 8498 Å, 8542 Å)		2	1			
Волокно	Hβ 4862 Å, FeI 4859 Å				19	7	26
КД	Hα 6563 Å + HeI 10830 Å + SiI 10827 Å	1	6+1c	2	1		1c+17
	CaII (3934 Å, 3968 Å, 8498 Å, 8542 Å)		3	2	2		
Спок. обл.	CaII (3934 Å, 3968 Å, 8498 Å, 8542 Å)			1	2		3

*c — означает «быстрый скан» (двумерная временная серия)

За год получено 123 временных серии, из них 34 выполнены в режиме «быстрый скан» (двумерная временная серия). Средняя длительность серий — 1 ч. Разброс по длительности составляет 20–206 мин. Кроме того, были сделаны десятки вспомогательных и калибровочных коротких серий общей длительностью около 20 ч.

2. На телескопе АЗТ-33ИК выполнены наблюдения площадок космических гамма-всплесков (GRB). С января по ноябрь 2016 г. наблюдались площадки 14 различных GRB (160131A, 160228A, 160313A, 160314A, 160327A, 160525B, 160601A, 160623A, 160629A, 160910A, 160912A, 160917A, 160925A, 161007A). По результатам измерений опубликовано 17 циркуляров Gamma-Ray Coordination Network (GCN).

На телескопе АЗТ-33ИК в 2016 г. в рамках информационного обеспечения автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) были получены фотометрические данные (кривые блеска в фильтрах BVRI) по 54 космическим аппаратам (КА), включая КА глобальной навигационной спутниковой системы «Глонасс», геостационарные телекоммуникационные спутники серий «Ямал», «Экспресс», «Луч», КА гидрометеорологических комплексов

«Электро-Л» и «Электро-Л2», лазерные юстировочные спутники «Эталон». Общее количество наблюдательных ночей — 84, количество полученных серий наблюдений — 298. Проведено наблюдение трех нештатных ситуаций и одного опасного сближения КА.

На телескопе АЗТ-33ИК продолжены мониторинговые фотометрические измерения оптического излучения микроквазара Cyg X-1 в полосах BVRI (16 ночей) и 3C273 (2 ночи). Данные по Cyg X-1 дополнены измерениями в ближнем инфракрасном диапазоне в полосах JH (четыре ночи).

На телескопе АЗТ-33ИК с помощью спектрографа АДАМ (рис. 215) выполнен спектроскопический обзор 18 кандидатов в квазары, для которых ранее не имелось определенных спектроскопических красных смещений.

Рис. 215. Спектрограф низкого и среднего разрешения АДАМ, установленный на телескопе АЗТ-33ИК

На модернизированном телескопе АЗТ-14А проводились регулярные траекторные наблюдения высокоорбитальных космических объектов (КО) в интересах системы контроля космического пространства. В течение 147 наблюдательных ночей осуществлены 1392 проводки по 873 каталогизированным высокоапогейным КО и 16 проводок по некаталогизированным КО.

На широкоугольном телескопе АЗТ-33ВМ в июле–сентябре 2016 г. проводились координатные и поисковые наблюдения астероидов. Осуществлены координатные измерения 142 астероидов, по 40 из которых не содержится информации в базе данных Центра малых планет. Четыре измеренных астероида относятся к астероидам, сближающимся с Землей (АСЗ). Наблюдения АСЗ 2016 — КО размером 45 м — проходили в момент его максимального сближения с Землей — на дистанции 2.5 миллиона километров. По трем неизвестным астероидам были проведены специальные астрометрические измерения в течение трех ночей. По результатам наблюдений эти астероиды были признаны объектами, открытыми в ССО. Им присвоены временные обозначения 2016 SX34, 2016 SZ34, 2016 SJ45. Данные по всем известным и вновь открытым астероидам опубликованы в циркулярах Центра малых планет.

В 2016 г. продолжены экспериментальные наблюдения КА Gaia (международный номер 39479), находящегося в окрестности точки Лагранжа L2. Наблюдения выполнялись на телескопах АЗТ-33ИК (две серии, две ночи) и АЗТ-33ВМ (две серии, две ночи).

На телескопе АЗТ-33ВМ проведены серии обзорно-поисковых наблюдений в области геостационарных орбит (ГСО) с целью обнаружения неизвестных объектов космического мусора. В процессе наблюдений общей длительностью около 24 ночных часов были получены данные о 153 КО, 45 из которых неизвестны или давно потеряны. Большая часть КО слабее 18 зв. величины, и почти все они не каталогизированы (рис. 216). Глубина обзора составила 21.5 зв. величины.

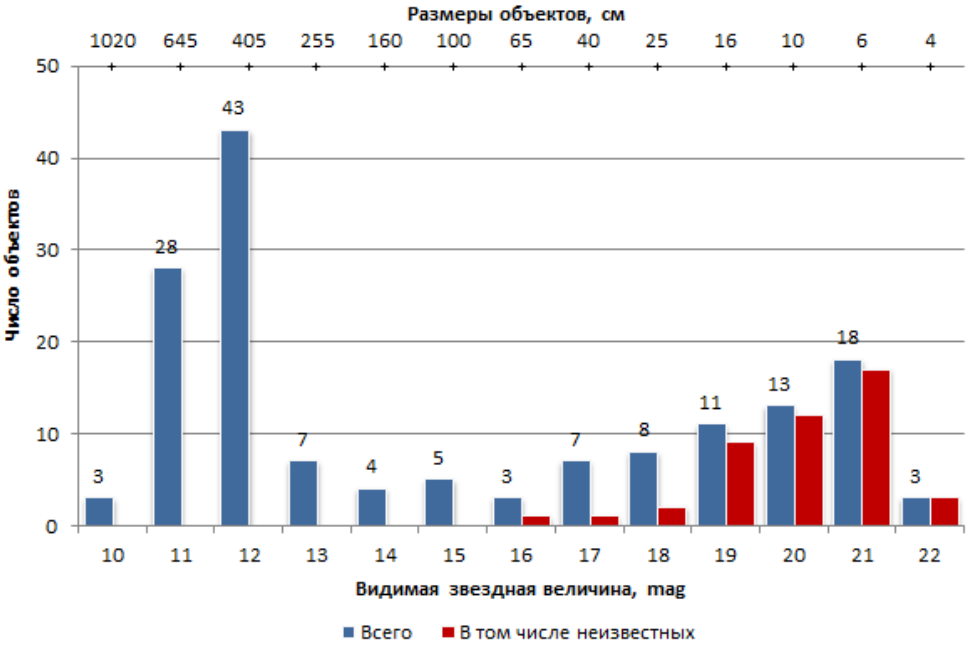


Рис. 216. Распределение объектов по блеску. На верхней оси отложен размер объектов, соответствующий диаметру сферы с диффузным отражением в области ГСО, коэффициент отражения принят 0.15

3. Ведется непрерывная регистрация вариаций космических лучей с минутным и часовым разрешением. Информация со станций космических лучей «Иркутск-2» и «Иркутск-3» передается в режиме реального времени в ИСЗФ СО РАН, мировой центр данных MCD и в международную базу данных NMDB.

Данные наблюдений и экспериментов, проведенных в ССО в 2016 г., служили основой для выполнения научно-исследовательских работ по следующим программам и госконтрактам:

- Диагностика межпланетной среды по данным наблюдений космических лучей.
- Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям.
- Исследование природы солнечных космических лучей и штормовых частиц.

4. На телескопе СТОП в рамках проекта СО РАН II.16.3.1. «Магнитные поля Солнца и природа солнечной активности» выполнялись регулярные измерения напряженности общего магнитного поля Солнца, регистрировались полнодисковые магнитограммы, показывающие распределение по диску Солнца крупномасштабных магнитных полей. Общее число дней наблюдений в январе–декабре составляет 73. Проведено 49 измерений напряженности общего магнитного поля Солнца и получена 61 магнитограмма крупномасштабных магнитных полей.

В обсерватории работали сотрудники Института космических исследований РАН, Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Совместно с учеными из Германии, Нидерландов, Китая, Монголии выполняются научные проекты и наблюдения в Саянской солнечной обсерватории. В рамках международной европейской организации солнечных обсерваторий JOSO (Joint Organization for Solar Observation) осуществляется обмен данными, выполняются комплексные наблюдения Солнца по совместным программам.

Регулярно проводятся экскурсии для школьников и абитуриентов.

В 2016 г. в ССО работали 28 научных сотрудников, штат постоянного обслуживающего персонала обсерватории состоит из 20 человек. При выполнении специальных и рутинных программ наблюдений группа научных сотрудников и инженеров составляет от 5 до 20 человек, включая дежурных наблюдателей.

5.3. Радиоастрофизическая обсерватория

Рис. 217. Общий вид РАО. Крестообразная антенная решетка — ССРТ. Рядом со зданием расположены спектрополяриметры

Радиоастрофизическая обсерватория (РАО) ИСЗФ СО РАН расположена в 230 км от Иркутска в Тункинской долине (урочище Бадары, Республика Бурятия). Основной инструмент обсерватории — уникальный Сибирский солнечный радиотелескоп.

Рис. 218. Радиоизображение Солнца, полученное на ССРТ на частоте 5.7 ГГц 9 ноября 2016 г.

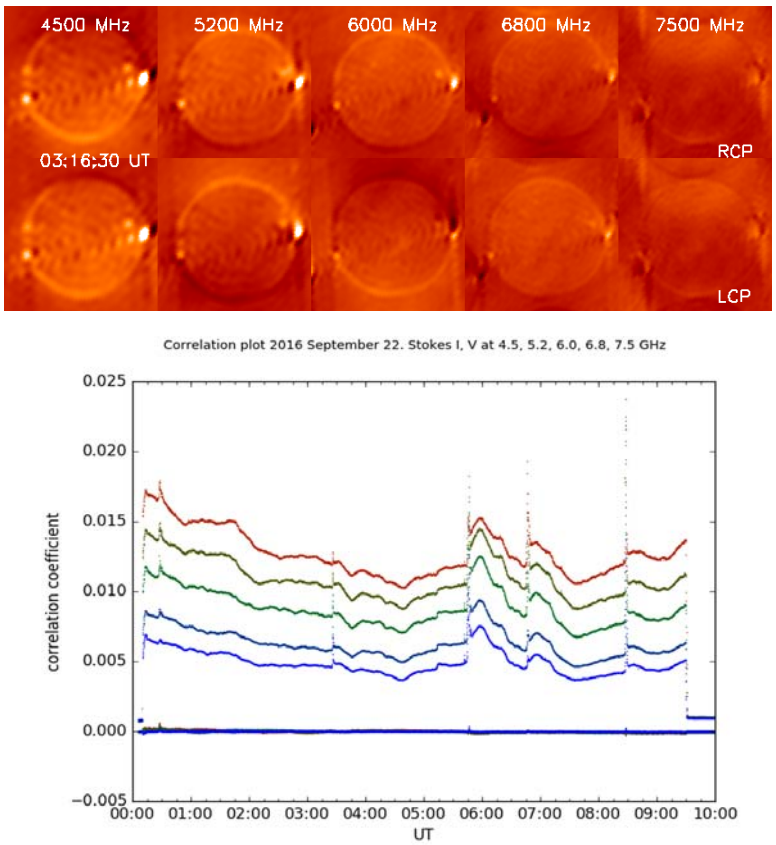


Рис. 219. Изображение Солнца на пяти частотах, полученное на Сибирском радиогелиографе (верхняя панель); корреляционные графики, полученные со сверхвысокой чувствительностью Сибирского радиогелиографа

Техническая база обсерватории включает:

- Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ), позволяющий получать двумерные радиоизображения Солнца с временным разрешением 1–4 мин (рис. 219). Регулярные ежедневные наблюдения ведутся с 1983 г. в светлое время суток, результаты наблюдений обрабатываются и хранятся как в обработанном, так и в исходном виде.
- Сибирский радиогелиограф, способный получать изображения Солнца на любой частоте в диапазоне от 4 до 8 ГГц. В настоящее время окончены пусконаладочные работы приемного оборудования и научный инструмент введен в эксплуатацию. В режиме регулярных наблюдений строятся радиоизображения Солнца на пяти частотах в обеих круговых поляризациях (219, верхняя панель) и корреляционные графики со сверхвысокой чувствительностью (219, нижняя панель).
- Комплекс спектрополяриметров полного потока излучения Солнца, перекрывающий полосу частот от 0.05 до 24 ГГц. Для диапазона 4–8 ГГц временное разрешение составляет до 10 мс, что позволяет наблюдать динамические спектры быстропротекающих процессов в солнечной короне. Для диапазона 2–24 ГГц время накопления сигнала в одном частотном канале до 0.1 с, частотное разрешение 50 МГц, количество каналов определяется задачей, в штатном режиме используется 16 каналов. В диапазоне 2–24 ГГц можно получать динамические спектры широкополосных всплесков микроволнового излучения Солнца. В диапазоне 50–500 МГц ведутся тестовые наблюдения в 4608 частотных каналах шириной менее 100 кГц. На рис. 220 приведен пример наблюдения солнечных всплесков II и III типов, имевших место в июле 2016 г.

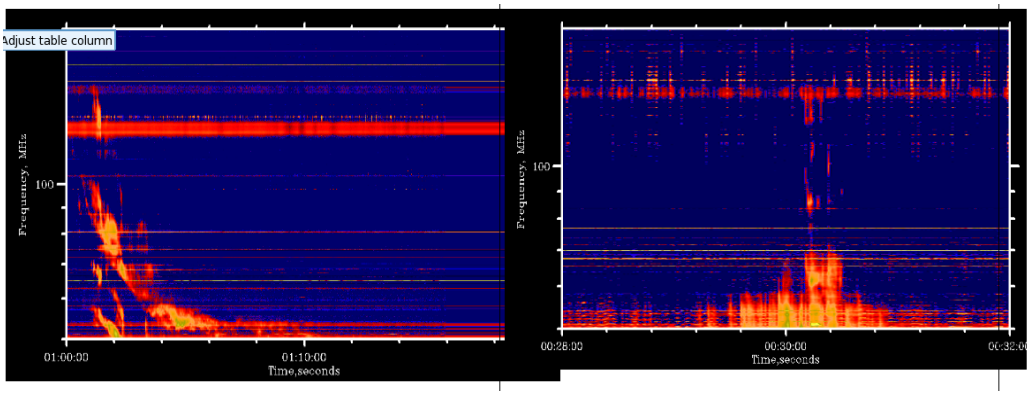


Рис. 220. Солнечные вспышки, произошедшие 10 (слева) и 19 (справа) июля 2016 г., зарегистрированные солнечным спектрополяриметром метрового диапазона

5.4. Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория

Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория располагает широким комплексом геофизических инструментов для наблюдения геомагнитного поля и параметров ионосферы. Фактически она включает в себя два научных геофизических стационара, находящихся на территории Иркутской области (п. Патроны, д. Узур), и две станции — в Красноярском крае (Норильск) и в Бурятии (с. Монды). Эти обсерватории проводят круглосуточный круглогодичный мониторинг околоземного космического пространства (рис. 221):

- параметров магнитного поля Земли (МПЗ) в различных диапазонах частот;
- параметров ионосферы в средних и авроральных широтах;
- параметров атмосферного электричества;
- параметров ПЭС по данным геостационарных спутников;
- параметров инфразвука;
- светимости ночного неба в средних широтах.

Рис. 221. Обсерватории, производящие круглосуточный круглогодичный мониторинг околоземного космического пространства

Магнитная обсерватория «Иркутск» (МО «Иркутск») — одна из старейших в России, основана в 1887 г., расположена в п. Патроны на расстоянии 21 км от Иркутска.

МО «Иркутск» предназначена для экспериментального исследования магнитного поля Земли (МПЗ) путем непрерывной трехкомпонентной регистрации как его абсолютных значений, так и вариаций в частотном диапазоне от 0 до 1 Гц. Она оснащена стандартными и уникальными магнитометрическими инструментами, позволяющими обеспечивать получение данных по геомагнитному полю на уровне мировых стандартов. Архивы обсерватории хранят непрерывный ряд наблюдений с 1887 г.

МО «Иркутск» с 1996 г., первая в России, включена в мировую сеть магнитных обсерваторий Intermagnet.

В 2016 г. в обсерватории проводились непрерывные наблюдения за вариациями геомагнитного поля тремя сериями магнитометров:

- трехкомпонентная феррозондовая станция Lemi-018;
- трехкомпонентная станция «Кварц»;
- трехкомпонентная магнитовариационная станция NVS.

Ежедневно проводились абсолютные измерения:

- полного вектора МПЗ протонным оверхаузеровским магнитометром POS-1;
- склонения и наклонения компонент геомагнитного поля высоклассным феррозондовым деклинометром-инклинометром MAG-001 фирмы «Бартингтон» (Англия) на теодолите фирмы «Цейсс».

Магнитная обс. «Иркутск» (международный код IRT) ежесуточно передает минутные данные вариационных наблюдений магнитного поля Земли в международную сеть Intermagnet (эти данные доступны по адресу www.intermagnet.org), а также ежечасно выставляет данные на интернет-странице Института по адресу http://magnit.iszf.irk.ru/ogmo/patron/, а также на сайте ИПГ.

Результаты наблюдений в обсерватории использовались для выполнения исследований по следующим направлениям:

- уточнение и детализация моделей постоянного геомагнитного поля, слежение за его вековыми вариациями, мониторинг процессов, связанных с медленными изменениями величины и направления земного магнитного момента, отражением которых является перемещение магнитных полюсов Земли;
- привязка спутниковых магнитных измерений при построении моделей постоянного и переменного геомагнитного поля, при разработке численных моделей магнитосферы;
- разработка методов определения по наземным данным распределения проводимости, электрического потенциала и плотности трехмерных токов в ионосфере и магнитосфере Земли;
- исследование природы магнитных возмущений, магнитосферных бурь и суббурь, их проявлений в среднеширотной магнитосфере;
- мониторинг фоновой магнитной обстановки при исследованиях ионосферных процессов и условий распространения радиоволн;
- оперативный мониторинг состояния переменного МПЗ при решении задач прогнозирования космической погоды.

Ионосферная станция «Иркутск»

Ионозонд DPS-4 является одним из наиболее современных и распространенных средств радиозондирования ионосферы.

DPS-4 состоит из основного блока, монитора; двух передающих антенн; четырех приемных антенн с поляризационными ключами; GPS-приемника и блока батарей резервного питания.

Эта станция позволяет получать полную и всеобъемлющую информации о следующих параметрах ионосферы:

- амплитуда (максимальное разрешение 3/4 дБ);

- фаза (максимальное разрешение 2π/256 рад);
- задержка (максимальное разрешение 16.66 мкс);
- доплеровский сдвиг частоты (максимальное разрешение 0.024 Гц);
- вертикальный угол прихода;
- азимутальный угол прихода.

Диагностика ионосферы включает восстановление профиля электронной концентрации и измерение скорости дрейфа ионосферной плазмы.

Восстановление профиля электронной концентрации осуществляется на основе обработки ионограмм.

Измерение скорости дрейфа ионосферной плазмы основано на измерении характеристик сигналов, отраженных от ионосферных неоднородностей.

В 2016 г. ионозонд, расположенный в ИСЗФ, отработал в штатном 15-минутном режиме без сбоев.

Байкальская магнитно-теллурическая обсерватория «Узур» расположена на севере о. Ольхон оз. Байкал в 350 км от Иркутска.

В БМТО в 2016 г. проводились непрерывные круглосуточные круглогодичные наблюдения низкочастотных горизонтальных электромагнитных полей на универсальной многокомпонентной станции Lemi-418, позволяющей измерять:

- вариации МПЗ в частотном диапазоне 0–1 Гц (трехкомпонентный феррозонд);
- трехкомпонентные измерения магнитных составляющих геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.001–200.0 Гц (индукционный нанотесламетр);
- земные токи, три компоненты ($E_{с\text{-}ю}$,$E_{в\text{-}з}$, $E_{в}$) в частотном диапазоне 0.001–200 Гц.

В настоящее время БМТО «Узур» является единственной станцией в России, где проволятся трехкомпонентные измерения земных токов. Кроме того, в обсерватории установлены:

- приемник сигналов с навигационных спутников GPS/GLONAS для определении ПЭС (полного электронного содержания) в ионосфере и магнитосфере;
- электростатический флюксметр для измерения вертикального градиента потенциала электрического поля атмосферы в приземном слое воздуха.

Бурятским научным центром на станции установлен приемник сейсмосигналов для исследования землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. В настоящее время он работает в штатном режиме наблюдений.

Данные этого комплекса ежедневно передаются по каналам Интернета в Институт для использования в исследованиях фундаментального и прикладного характеров.

Непрерывные наблюдения в БМТО за геомагнитными пульсациями ведутся с 1967 г. Таким образом, имеются данные наблюдений за 49 лет, а за предшествующие 5 лет — фрагментарные материалы регистрации. В архиве данных имеются уникальные материалы синхронных записей шести компонент низкочастотного электромагнитного поля, выполненные во время специальных экспериментов на льду оз. Байкал.

Необходимо отметить следующее. Этот стационар находится в зоне повышенной сейсмической активности, вдали от промышленных предприятий, дающих электромагнитные помехи при высокочувствительных и прецизионных наблюдениях за комплексом геоэлектрических явлений. Такие условия позволяют проводить уникальные высокоточные эксперименты по регистрации параметров окружающей среды, начиная с поверхности Земли и вплоть до орбиты геостационарных спутников.

Материалы, получаем в этой обсерватории, в дальнейшем будут использоваться для решения целого ряда важных фундаментальных и прикладных научных задач, в том числе:

- изучение резонансных колебаний магнитосферы, наземная локация по данным одной станции положения резонансной магнитной оболочки;
- поиск электромагнитных предвестников землетрясений;

- наблюдение за распространяющимися в ионосфере электромагнитными сигналами, вызванными воздействием на ионосферу процессов в магнитосфере и литосфере;
- регистрация слабых электромагнитных излучений, генерируемых микро- и макропроцессами на границе магнитосферы при взаимодействии ее с солнечным ветром.

Работа такого экспериментального комплекса в БМТО «Узур» свидетельствует о новом современном витке в развитии экспериментальной базы электромагнитных наблюдений не только для ИСЗФ СО РАН, но и для многих заинтересованных академических институтов и других ведомств.

Необходимо отметить, что, помимо наблюдений в вышеуказанных обсерваториях, КМИО проводит регулярные наблюдения за комплексом геофизических явлений в следующих пунктах:

Пункт «Монды» (51.62° N; 100.92° E.) расположен на территории ССО.

В «Мондах» установлен и функционирует современный цифровой индукционный нанотесламетр Lemi-30, который производит регистрацию геомагнитных пульсаций в диапазоне частот 0–30 Гц. В настоящее время этот прибор работает в круглосуточном режиме.

В пункте «Монды» установлен электростатический флюксметр для измерения вертикального градиента потенциала электрического поля атмосферы в приземном слое воздуха.

Для приема сигналов со спутников GPS/ГЛОНАСС в «Мондах» установлен двухчастотный приемник Javad Delta-G3T, модифицированный для проведения амплитудных измерений. Приемник работает в комбинации с антенной RingAnt-G3T. Для монтажа антенны в горизонтальном положении использована специальная двухпластинная конструкция, аналогичная установленным в других обсерваториях ИСЗФ СО РАН (Усолье, Листвянка, Торы, Патроны).

Приемник обеспечивает кодовые, фазовые и амплитудные измерения на частотах L1 и L2 одновременно по всем находящимся в зоне видимости спутникам GPS, ГЛОНАСС, GALILEO. Данные измерений поступают непосредственно в управляющий компьютер, где производится их запись и временное хранение. Передача данных из управляющего компьютера в центр сбора данных в ИСЗФ СО РАН производится с курьером.

Ниже на рис. 222 проводятся результаты спектральной обработки синхронных наблюдений геомагнитных пульсаций и вариаций ПЭС по данным приборов, установленных в пункте «Монды». Данные приведены для момента внезапного начала (SSC). Следует отметить, что это, пожалуй, первый случай регистрации синхронных вариаций ПЭС и геомагнитных пульсаций с периодами от единиц секунд до 150 с. Ранее подобные наблюдения проводились для очень длиннопериодных колебаний магнитного поля Земли (более 300 с).

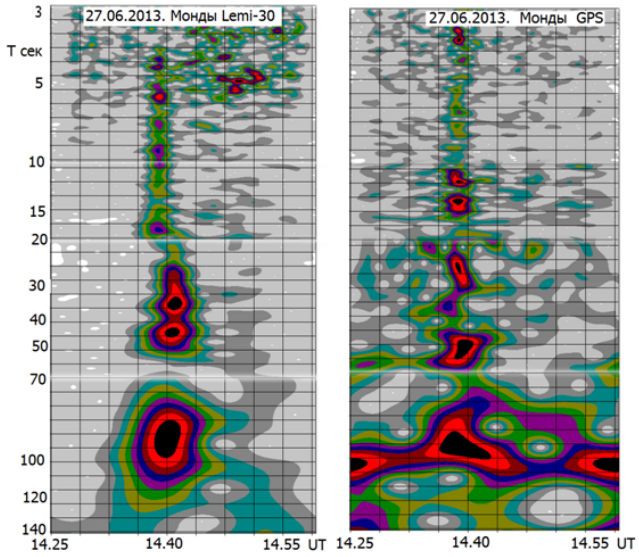


Рис. 222. Синхронные вариации геомагнитных пульсаций и параметров ПЭС

На рис. 222 видно хорошее совпадение спектральных компонент в диапазоне периодов 20–150 с. В более высокочастотной области (3–20 с) такого подобия не наблюдается. Заметим, что анализ экспериментального материала затруднен следующим обстоятельством: необходимо, чтобы спутник, с которого принимается информация, находился в силовой трубке, где происходит развитие магнитного возмущения, а наземная станция — в месте проекции этой силовой трубки на поверхность Земли. Очевидно, что пространственное совпадение всех трех составляющих эксперимента: спутник, магнитное возмущение, наземная станция — случается довольно редко. Мы проанализировали более трех десятков случаев, и только один эксперимент удовлетворил вышеперечисленным условиям.

Норильская комплексная магнитно-ионосферная станция (КМИС г. Норильск, Красноярский край).

На этой станции проводятся наблюдения за комплексом магнитосферно-ионосферных возмущений. В настоящее время на КМИС проводятся:

Вариационные наблюдения за магнитным полем Земли

На КМИС функционируют три дублирующие магнитовариационные станции:

- цифровая трехкомпонентная феррозондовая станция Lemi-008;
- аналоговая станция «Кварц» на основе датчиков Боброва с выходом на ПК;
- кварцевая магнитовариационная станция.

Абсолютные измерения МПЗ. Измерения проводятся:

- оверхаузеровским протонным магнитометром POS-1 — полный вектор;
- феррозондовым деклинометром-инклинометром MAG-01H THEO 015 B — регистрация наклонения и склонения ЭМПЗ.

Наблюдения геомагнитных пульсаций. Наблюдения ведутся с помощью трехкомпонентного индукционного магнитометра Lemi-30 (частотный диапазон 0–30 Гц).

Ежедневно данные о МПЗ передаются на сервер Института по каналам Интернета.

Вертикальное зондирование ионосферы осуществляется с помощью цифрового дигизонда DPS-4 (работает с 2002 г.), аналогичного установленному на ионосферной станции «Иркутск». Основное назначение дигизонда — регистрация ионограмм вертикального зондирования с последующим расчетом профиля электронной концентрации и ряда ионосферных характеристик (амплитуды, фазы, задержки, доплеровского сдвига частоты, вертикального угла прихода, азимутального угла прихода).

В 2016 г. ионозонд работал в штатном 15-минутном режиме без сбоев.

Наклонное зондирование ионосферы производится с помощью ЛЧМ-установки.

Установленная на КМИС система спутникового интернета позволяет оперативно поставлять данные наблюдений в Институт по системе удаленного доступа практически со всех инструментов, установленных на Норильской КМИС, с любой степенью скважности, вплоть до реального времени.

Таким образом, Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория ведет круглогодичную, круглосуточную регистрацию параметров МПЗ и его колебаний во всем диапазоне частот, мониторинг состояния ионосферы как в средних широтах, так и в авроральной зоне. Эти данные используются в подавляющем большинстве программ и проектов, ведущихся в Институте, а также в рамках международных научных программ при исследовании процессов в солнечно-магнитосферно-атмосферной системе и для мониторинга и прогноза космической погоды. Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория первой в России включена в международную программу сбора геомагнитных данных Intermagnet. Информация, полученная в обсерватории, передается в отечественные и международные центры сбора данных, используется для обмена. Результаты наблюдений выставляются в сети Интернет на домашней интернет-странице ИСЗФ (www.iszf.irk.ru) и на сайтах других исследовательских центров (ИЗМИРАН — www.izmiran.rssi.ru, ААНИИ — www.aari.nw.ru, Intermagnet — www.intermagnet.ru, Токийский университет — http://hpep3.eps.s.u-tokyo.ac.jp и др.).

В целом в 2016 г. практически все виды наблюдений велись в рамках отечественных и международных программ, проводился весь комплекс обсерваторских наблюдений для выполнения следующих фундаментальных задач:

- исследование процессов формирования космической погоды и разработка методов ее диагностики и прогнозирования;
- сбор информации для построения моделей передачи энергии от солнечных источников в магнитосферу и атмосферу Земли;
- изучение физических процессов воздействия Солнца и солнечного ветра на земной климат и метеоусловия;
- пополнение многолетних рядов наблюдений с целью выявления и уточнения долговременных трендов и тенденций в солнечно-земных процессах;
- сбор и передача результатов наблюдений, их интерпретация и представление в общедоступном виде в сети Интернет и других средствах массовой информации.

В 2016 г. на стационарах Комплексной магнитно-ионосферной обсерватории ИСЗФ СО РАН всего работало 26 научных сотрудников Института, 18 сотрудников других институтов, 5 представителей СО РАН, 3 представителя различных вузов (Бурятский государственный университет, Байкальский государственный университет, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутский государственный университет путей сообщения.

5.5. Норильская комплексная магнитно-ионосферная станция

Основной задачей Норильской КМИС является проведение регулярных координированных наблюдений на комплексе радиофизических, магнитометрических, космофизических и оптических инструментов по программам фундаментальных исследований СО РАН, Президиума РАН, а также в рамках совместных научных исследований с организациями РАН, Минобрнауки, Роскосмоса и международных проектов. Полученные данные о характеристиках высокоширотной ионосферы и магнитосферы используются при уточнении и построении различных моделей околоземного космического пространства, исследованиях механизмов взаимодействия солнечного ветра с земной магнитосферой и для диагностики внутримагнитосферных и ионосферных процессов, оказывающих влияние на работу космической техники и на качество космических и ионосферных радиоканалов.

На КМИС выполняются:

- *наблюдательные программы* алертного характера во время экстремальных событий на Солнце, в магнитосфере и нижних слоях атмосферы с представлением информации на сайты Института и обсерваторий для использования другими институтами и организациями, работающими в области солнечно-земной физики;
- *специальные эксперименты* в рамках госзаказов и договоров в интересах различных ведомств.

На Норильской КМИС хранится в архиве непрерывный ряд данных с 1964 г. и в настоящее время продолжается непрерывный круглосуточный круглогодичный мониторинг следующих характеристик околоземного космического пространства:

- вариаций МПЗ;
- абсолютных значений главных компонент МПЗ;
- параметров инфранизкочастотных колебаний магнитного поля (геомагнитные пульсации);
- вариаций потока нейтронов космических лучей на поверхности Земли;
- вариаций поглощения космического радиошума в D-области ионосферы.

Кроме того, ведется вертикальное зондирование ионосферы цифровым дигизондом DPS-4 с регистрацией:

- высотно-частотных характеристик ионосферы;
- ионограмм с последующим расчетом профиля электронной концентрации.

В последние годы КМИС была оснащена современными средствами регистрации и первичной обработки данных наблюдений, и в настоящее время на Норильской КМИС функционирует следующий комплекс геофизических инструментов:

- Три дублирующие магнитовариационные станции:

– цифровая трехкомпонентная феррозондовая станция Lemi-008;

– аналоговая станция «Кварц» на основе датчиков Боброва с выходом на ПК;

– кварцевая магнитовариационная станция.

- Приборы для абсолютных измерений магнитного поля Земли:

– оверхаузеровский протонный магнитометр POS-1 (полный вектор МПЗ);

– феррозондовый деклинометр-инклинометр MAG-01H THEO 015 B (регистрация наклонения и склонения ЭМПЗ).

В 2016 г. на Норильской КМИС проводились ремонтные и профилактические работы по обслуживанию аппаратуры магнитометрического комплекса.

1. На Норильской КМИС была запущена в постоянную круглосуточную работу кварцевая магнитовариационная станция (МВС). МВС (изготовлена С.А. Нечаевым в Магнитной обсерватории «Иркутск») смонтирована в вариационном павильоне КМИС, настроена и откалибрована. Данные с МВС поступают на компьютер в техническом здании и обрабатываются в соответствии со стандартами сети Intermagnet.

2. Проведена ревизия заземления в абсолютном павильоне. Сопротивление заземления составляет 80 Ом и выше, что препятствует нормальной работе высокоточного магнитометра POS-1 и вызывает сильные электромагнитные помехи. С целью снижения помех была изменена схема питания аппаратуры с использованием источника бесперебойного питания двойного преобразования APCSURT. В настоящее время POS-1 устойчиво работает практически без электромагнитных помех.

3. Проведена ревизия и выполнен ремонт электроснабжения вариационного павильона, составлены схемы. Отрегулирована система термостабилизации. Проведено полное техническое обслуживание аппаратуры и компьютеров, используемых в магнитометрических измерениях. В частности, восстановлены устойчивая передача данных на ftp-сервер ИСЗФ СО РАН и удаленное управление компьютерами сбора и обработки магнитных данных Норильской КМИС.

4. Проведено обучение техников-наблюдателей, выявлены и исправлены ошибки в проведении наблюдений и обработке данных.

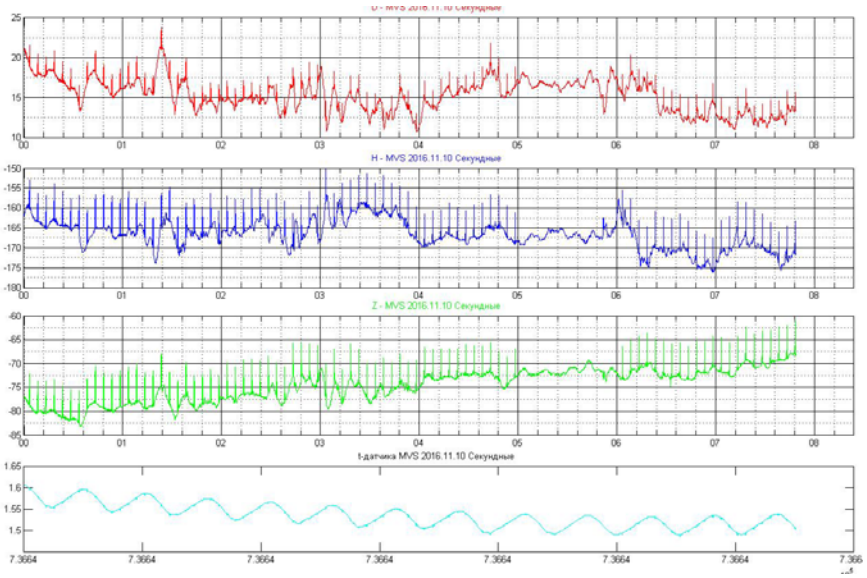


Рис. 223. Данные МВС. Помехи от ЛЧМ-передатчика, между часами 05 и 06 ЛЧМ-передатчик был выключен

Вертикальное зондирование ионосферы осуществляется с помощью цифрового дигизонда DPS-4 (работает с 2002 г.) Основное назначение — регистрация ионограмм вертикального зондирования с последующим расчетом профиля электронной концентрации и следующих ионосферных характеристик:

- амплитуда (максимальное разрешение 3/4 дБ);
- фаза (максимальное разрешение 2π/256 рад);
- задержка (максимальное разрешение 16.66 мкс);
- доплеровский сдвиг частоты (максимальное разрешение 0.024 Гц);
- вертикальный угол прихода;
- азимутальный угол прихода.

В 2016 г. были выполнены следующие профилактические и ремонтные работы на дигизонде DPS-4:

- профилактическое обслуживание DPS-4;
- замена неисправных плат — платы синхронизатора, платы осциллятора, антенного переключателя;
- настройка программного обеспечения DOS-компьютера;
- профилактическое обслуживание WINNT-компьютера;
- замена вышедшего из строя жесткого диска WINNT-компьютера;
- настройка программного обеспечения WINNT-компьютера;
- настройка передачи данных на ftp-сервер.

Кроме того, проведены мероприятия по поддержанию работоспособности и обслуживанию антенного комплекса радиофизических инструментов Норильской комплексной магнитно-ионосферной станции:

- профилактическое обслуживание приемных антенн DPS-4;
- очистка просеки передающей антенны DPS-4 от кустов и деревьев;
- профилактика изоляторов передающей антенны DPS-4;
- проверка растяжек мачты передающей антенны DPS-4.

Наклонное зондирование ионосферы

В 2016 г. на радиофизическом комплексе ЛЧМ-установки Норильской КМИС были проведены следующие ремонтно-профилактические работы:

- ремонт передающей антенны типа DLP-22 (замена порванных вибраторов, ревизия питающего кабеля и разъемов, ревизия крепления и оттяжек мачты);
- ремонт усилителя мощности BLA 350 (замена выходных транзисторов, установка устройства защиты);
- установка и подключение нового устройства GPS-синхронизации;
- установка приемно-регистрирующего комплекса для ЛЧМ-сигналов на наклонных трассах;
- монтаж и установка антенны для приема радиосигналов на наклонных трассах.

В настоящее время ЛЧМ-установка работает в штатном режиме. Пример ионограммы наклонного зондирования для трассы Норильск–Торы приведен на рис. 224.

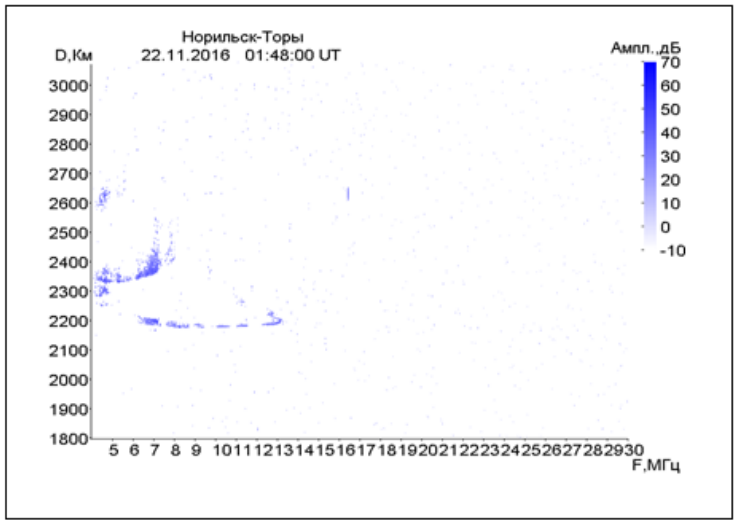


Рис. 224. Ионограмма наклонного зондирования для трассы Норильск–Торы

Установленная на КМИС система спутникового интернета позволяет оперативно поставлять данные наблюдений в Институт по системе удаленного доступа практически со всех инструментов, установленных на Норильской КМИС, с любой степенью скважности, вплоть до реального времени.

Выносная точка «Исток» Норильской КМИС

Рис. 225. Вид выносной точки «Исток» с элементами инфраструктуры

В настоящее время на выносной точке «Исток» функционирует следующий комплекс инструментов:

1. Индукционный магнитометр Lemi-30 (частотный диапазон 0–30 Гц) — регистрация геомагнитных пульсаций.

2. Станция спутникового мониторинга ионосферы на базе приемника сигналов ГЛОНАСС/GPS Javad-DELTA-G3T с антенной RingAnt-G3T и промышленного компьютера eBox-3300MX.

3. Установка наклонного зондирования (ЛЧМ-установка).

На рис. 226 приводится ионограмма, полученная на установке наклонного зондирования для трассы «Исток»–Хабаровск.

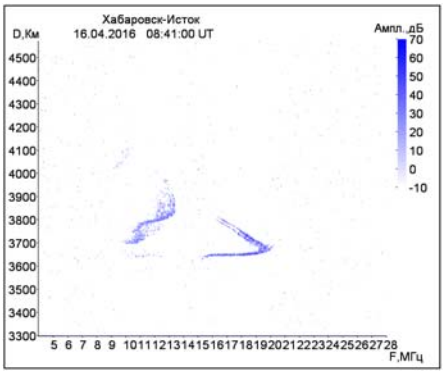


Рис. 226. Ионограмма, полученная на установке наклонного зондирования («Исток»)

4. Оптический комплекс, включающий следующее оборудование:

- спектрограф Shamrock 303i;
- широкоугольная обзорная камера CSDU-285-C с ПЗС-матрицей SONY CCD ICX285AQ для регистрации вариаций излучения ночной атмосферы в спектральном RGB-диапазоне. Поле зрения камеры ~100°, экспозиция 15 с;
- широкоугольная камера «Видеоскан-11002», предназначенная для исследования пространственного распределений вариаций излучения атмосферы в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Поле зрения камеры ~140°, экспозиция 30 с;
- широкоугольная камера CSDU-423-1 для исследования пространственного распределения вариаций интенсивности эмиссии атомарного кислорода в линии 630 нм. Поле зрения камеры ~70°, экспозиция 30 с;
- широкоугольная камера CSDU-423-2 для исследования пространственного распределений вариаций излучения атмосферы в спектральном диапазоне 420–530 нм. Поле зрения камеры ~70°, экспозиция 30 с;
- широкоугольная обзорная камера SDU-415C с ПЗС-матрицей SONY CCD ICX415AQ в термоизолированном кожухе, предназначенная для регистрации пространственной картины вариаций излучения ночной атмосферы в спектральном RGB-диапазоне. Поле зрения ~100°, экспозиция 30 с.

На рис. 227 приводится пример синхронной регистрации различных параметров полярных сияний и вариаций магнитного поля Земли.

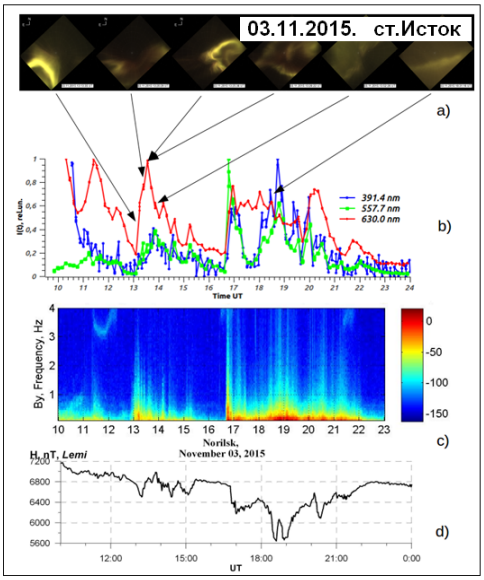


Рис. 227. Синхронные вариации полярных сияний и геомагнитных пульсаций: *a* — снимки полярных сияний широкоугольной камерой; *b* — вариации интенсивности полярных сияний в различных длин волн; *c* — спектрограмма геомагнитных пульсаций; *d* — вариации геомагнитного поля по данным Норильской КМИС

Подготовительные работы для установки магнитовариационной станции

На выносной точке «Исток» Норильской КМИС проведены работы по подготовке площадки для размещения магнитовариационной станции (МВС):

1. На предварительно выбранном в 2015 г. месте размечена прямоугольная площадка размером 50×70 м. С шагом 5 м вбиты деревянные колья.

2. Проведена площадная магнитная съемка над вбитыми колышками на высоте 1 м с использованием протонного магнитометра POS-1. По результатам магнитной съемки проведен расчет градиентов естественного магнитного поля и определена точка с наименьшими градиентами для размещения МВС.

3. Проведена проверка размеченной площадки на наличие металлических предметов, которые могут искажать естественное геомагнитное поле. Для этой цели использовался профессиональный металлодетектор Minelab Safari. Было удалено несколько железных гвоздей и банок. В целом площадка соответствует требованиям для размещения МВС.

4. Проведены абсолютные наблюдения трех компонент геомагнитного поля. Наблюдения осложнялись низкими температурами. Наблюдения подтвердили результаты 2015 г.

Рис. 228. Проверка размеченной площадки на наличие металлических предметов на выносной точке «Исток» профессиональным металлодетектором Minelab Safari

Рис. 229. Проведение абсолютных магнитных наблюдений на выносной точке «Исток»

Данные ст. «Норильск» и пункта «Исток» используются многими исследователями при изучении солнечно-земных связей, поскольку они доступны в реальном времени. Географически пункты «Норильск» и «Исток» занимают важное место в распределении приполярных станций (Апатиты, Тикси, м. Шмидта, Inuvik, Nain, Pewanuk, Fort Smith), что делает их данные актуальными при исследовании магнитосферно-ионосферных взаимодействий. Непрерывный мониторинг и представление данных в реальном времени позволяют использовать материалы этих станций для решения задач космической погоды (отслеживание алертных ситуаций с протонными событиями, мониторинг магнитосферных возмущений, оценка предвестников геомагнитных возмущений и т.п.).

Организации, с которыми ведутся совместные работы по анализу данных и развитию обсерваторских наблюдений:

- ИЗМИРАН, Троицк — регистрация нейтронной компоненты космических лучей;
- Геофизическая служба РАН, Обнинск — геодинамический мониторинг с помощью GPS;
- ИФЗ, Геофизическая обсерватория «Борок», Ярославская обл., п. Борок;
- ААНИИ, Санкт-Петербург;
- СПбФИЗМИРАН, Санкт-Петербург;
- ИДГ, Москва;
- ИКФИА ЯНЦ СО РАН, Якутск;
- ПГИ КНЦ РАН, Апатиты;
- ИКИР ДВНЦ СО РАН, Петропавловск-Камчатский.

5.6. Геофизическая обсерватория

Геофизическая обсерватория (ГФО) расположена на расстоянии 150 км от Иркутска в Республике Бурятия вблизи с. Торы (103° E, 51°42′ N, высота над уровнем моря 530 м). В обсерватории проводится мониторинг структуры и динамики верхней и средней атмосферы радиофизическими и оптическими методами.

Экспериментальная база обсерватории включает в себя следующее оборудование:

1. Широкоугольная высокочувствительная фотокамера ФИЛИН-1Ц (фотокамера для исследования люминесцентного излучения неба) на базе ПЗС-матрицы, предназначенная для регистрации и исследования собственного излучения атмосферы, его пространственно-временных вариаций, естественных и искусственных космических объектов (метеоров, космических аппаратов), контроля прозрачности атмосферы и решения некоторых других задач;

2. Патрульный спектрометр САТИ-1М с низким спектральным разрешением, предназначенный для регистрации спектрального состава и пространственного распределения собственного излучения верхней атмосферы Земли. Основное назначение — исследование возмущений в основных эмиссионных линиях и полосах (OI 557.7 нм, OI 630.0 нм, NaI 589.0–589.6 нм и др.) при гелиогеофизических возмущениях различной природы. Позволяет получать двумерное изображение дуги небесной сферы в диапазоне длин волн 400–700 нм;

3. Спектрометр (ИКС-1), предназначенный для измерения вращательной температуры нейтральной атмосферы на высотах 80–100 км и интенсивности излучения ночного неба в спектральном диапазоне 820–870 нм.

4. Высокочувствительная оптическая система, предназначенная для регистрации быстрых вариаций (~5–100 мс) в излучении ночного неба на базе электронно-оптического

преобразователя (ЭОП) ЭПМ102Г-04-22С и ПЗС-камеры SDU-R259. Для исследования быстрых вариаций в спектральном распределении излучения ночного неба и для работы при высокой освещенности (зодиакальный свет, Луна) оптическая система работает в составе высокочувствительного спектрографа в на базе монохроматора МДР-2.

5. Спектрограф на базе монохроматора МДР-12 и ПЗС-камеры CSDU-423, предназначенный для регистрации спектрального состава и пространственного распределения собственного излучения верхней атмосферы Земли.

6. Сканирующий интерферометр Фабри–Перо KEO Arinae, предназначенный для измерения температуры и скорости ветра на высотах высвечивания эмиссий.

7. Солнечный фотометр CIMEL-CE-318, предназначенный для измерений прозрачности и влагосодержания в атмосфере.

8. Широкоугольная оптическая система KEO Sentinel, предназначенная для регистрации пространственной картины интенсивности эмиссии 630 нм.

9. Инфразвуковая станция, предназначенная для выделения акустических сигналов инфразвукового диапазона в атмосфере Земли.

10. Цифровое многоканальное приемно-передающие устройство, позволяющее работать в режимах ЛЧМ (вертикальное, наклонное, возвратно-наклонное зондирование) и фиксированных частот (доплеровские измерения). Набор антенно-фидерных устройств позволяет работать в КВ- и УКВ-диапазонах.

В 2016 г. проводились регулярные наблюдения на оптическом комплексе Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН:

- наблюдения эмиссии OI 557.7 нм (максимум высоты высвечивания ~97 км) и 630 нм (~250 км), натрия NaI 589.0–589.6 нм (~92 км);
- наблюдения с помощью цветной камерой ФИЛИН-1Ц для контроля прозрачности атмосферы и регистрации интегральной светимости ночной атмосферы;
- патрульные спектрометрические наблюдения собственного излучения средней и верхней атмосферы в ближней ИК-области спектра.

Регистрация спектров проводится на инфракрасном спектрометре с высоким спектральным разрешением (ИКС-1). По полученным спектрам определены спектральные характеристики (интенсивность, температура) эмиссий молекул гидроксила (полоса 6–2, 834.0 нм) и атмосферной системы молекулярного кислорода (полоса 0–1, 864.5 нм), возникающих на высотах мезосферы и нижней термосферы. Проведена обработка полученных экспериментальных данных, пополнен архив, ведущийся с 2008 г.

В течение 2016 г. продолжались непрерывные наблюдения с помощью ЛЧМ-ионозонда. Были получены данные со следующих наклонных трасс: Усолье–Торы, Норильск–Торы, Хабаровск–Торы, Магадан–Торы, Салехард–Торы, Диксон–Торы, Кипр–Торы. Были получены также данные вертикального зондирования с ЛЧМ-ионозонда моностата ГФО ИСЗФ СО РАН. Проведена обработка полученных данных, пополнен архив данных.

В 2016 г. на базе ГФО были проведены испытания нового оборудования для модернизации передающих пунктов сети ЛЧМ-зондирования ИСЗФ СО РАН. После успешных испытаний новое оборудование было установлено в следующих передающих пунктах: Усолье, Норильск, Магадан, Хабаровск.

В 2016 г. проводился непрерывный мониторинг инфразвуковых сигналов на инфразвуковой станции, который позволил оценить уровень естественного атмосферного фона и выделить несколько типов инфразвуковых сигналов, например, низкочастотные инфразвуковые колебания в сейсмоактивные периоды, инфразвуковой сигнал от землетрясения на территории Монгольской Народной Республики в районе оз. Хубсугул.

Данные наблюдений ГФО использовались при исследованиях:

I. Проявления сейсмических событий в собственном излучении верхней атмосферы Земли. Выполнены исследования поведения атмосферной эмиссии атомарного кислорода [OI] 557.7 нм во время землетрясений (ЗТ) с магнитудой M≥5 в Байкальской рифтовой зоне в 2014–2016 гг.

Анализ вариаций атмосферной эмиссии [OI] 557.7 нм в периоды зарегистрированных ЗТ (16 событий) позволил выявить более высокие значения средних ночных интенсивностей этой эмиссии в дни, предшествующие ЗТ, по сравнению с последующими днями. Амплитуда изменений средних ночных значений эмиссии 557.7 нм от максимальных перед ЗТ до минимальных в последующие дни в среднем достигает значений 40–60 %, а для отдельных событий может достигать значений ≥100–200 %. Возможные механизмы вариации эмиссии 557.7 нм в периоды ЗТ могут быть связаны как непосредственно с источниками, сопутствующими подготовке и развитию ЗТ, так и с независимым влиянием динамики нижней атмосферы отдельно на сейсмическую активность и верхнюю атмосферу, приводящим к корреляции этих процессов, не связанных причинно-следственными связями.

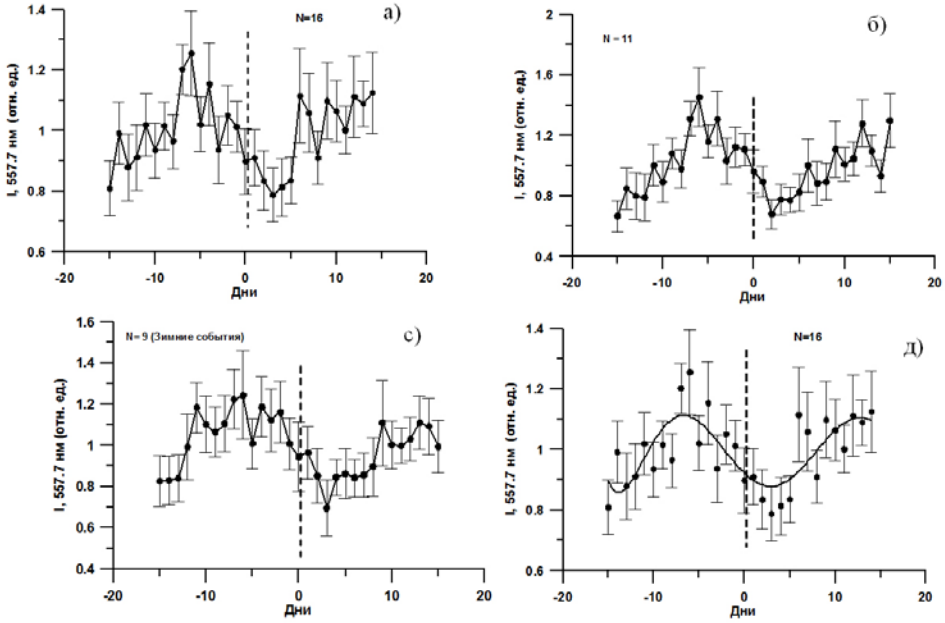


Рис. 230. Вариации относительных интенсивностей эмиссии 557.7 нм в период ЗТ, полученных с использованием метода наложенных эпох: *а* — для всех анализируемых событий (*N*=16), *б* — для событий с выраженной тенденцией к вариациям интенсивности 557.7 нм (*N*=11), *в* — для событий в зимний период (*N*=9), *г* — при аппроксимации полиномом 6-й степени. День ЗТ указан вертикальной штриховой линией

II. Особенности сезонного хода атмосферной эмиссии 557.7 нм по данным наблюдений в регионе Восточной Сибири. Выполнены исследования и анализ сезонного хода (СХ) эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм, полученного за 20-летний период наблюдений (1997–2016 гг.), охватывающий два последних солнечных цикла. В настоящее время принято считать, что вариабельность характеристик излучения верхней атмосферы, включая сезонный ход эмиссий атмосферных составляющих, во многом определяется глобальной циркуляцией на высотах мезосферы. Определенный вклад в наблюдаемые вариации атмосферных эмиссий вносят изменения солнечной активности и динамические процессы в нижней атмосфере. В этом случае наблюдаемые особенности сезонного хода атмосферной эмиссии 557.7 нм и его вариабельность могут отражать изменения в верхней атмосфере, связанные многолетними вариациями в нижней атмосфере, солнечной активностью и климатическими изменениями.

В ходе исследований:

1. Выявлено качественное подобие СХ эмиссии 557.7 нм, полученного по наблюдениям в регионе Восточной Сибири в период 1997–2016 гг., с СХ для некоторых среднеширотных станций Северного полушария во второй половине прошлого века. Отличие заключается в менее выраженном летнем максимуме и экстремально низком значении интенсивности эмиссии 557.7 нм в апреле.

2. Проведено сопоставление СХ эмиссии 557.7 нм в 23-м и 24-м солнечных циклах

показавшее большие значения среднемесячных значений эмиссии 557.7 нм в летние и зимние месяцы в 23-м солнечном цикле, имеющем более высокий уровень солнечной активности, по сравнению с аналогичными месяцами в 24-м солнечном цикле.

3. По данным наблюдений в 1997–2016 гг. значимые коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями интенсивности эмиссии 557.7 нм и индексом солнечной активности *F*10.7 получены только для осенних и зимних месяцев. Это согласуется с выводами работы [Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н. Сезонные вариации зависимости эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм от солнечной активности и многолетнего тренда // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 4. С. 557–56] о снижение зависимости эмиссии 557.7 нм от солнечной активности в летние месяцы.

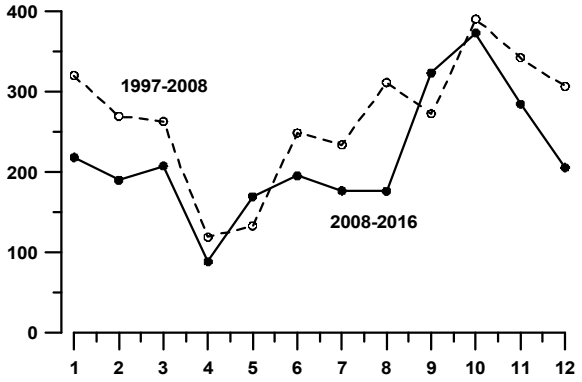


Рис. 231. Сезонный ход эмиссии 557.7 нм в 23-м (штриховая линия) и 24-м (сплошная линия) солнечных циклах по данным наблюдений в ГФО ИСЗФ СО РАН

III. При развитии методов диагностики ионосферы и верхней атмосферы Земли. Исследовались возможности использования цветовой фотометрии ночной атмосферы с применением цветной ПЗС-камеры с учетом собственного излучения верхней атмосферы и особенностей его спектрального состава. Использовались данные наблюдений свечения ночной атмосферы за 2010–2015 гг. и частично за 2016 г. в ГФО ИСЗФ СО РАН камерой с охлаждаемой цветной ПЗС-матрицей Kodak KAI-11002. Получены оценки средней светимости ночного неба в спектральных диапазонах R-, G-, B-каналов цветной камеры для региона Восточной Сибири с характерными значениями ~0.008–0.01 эрг·см$^{-2}$·с$^{-1}$. Определен сезонный ход светимостей ночного неба в R-, G-, B-каналах цветной камеры, характеризующийся понижением в весенние месяцы, возрастанием в осенние месяцы и наличием летнего максимума, который объясняется рассеянным солнечным светом и связан с месторасположением ГФО. Рассмотрены геофизические явления, имеющие оптические проявления в R-, G-, B-каналах цветной камеры. Показана возможность для некоторых геофизических явлений (геомагнитных бурь, внезапных зимних стратосферных потеплений) количественно связывать усиление сигналов в G- и R-каналах с ростом интенсивностей дискретных эмиссий 557.7 и 630.0 нм, которые доминируют в спектре собственного излучения верхней атмосферы.

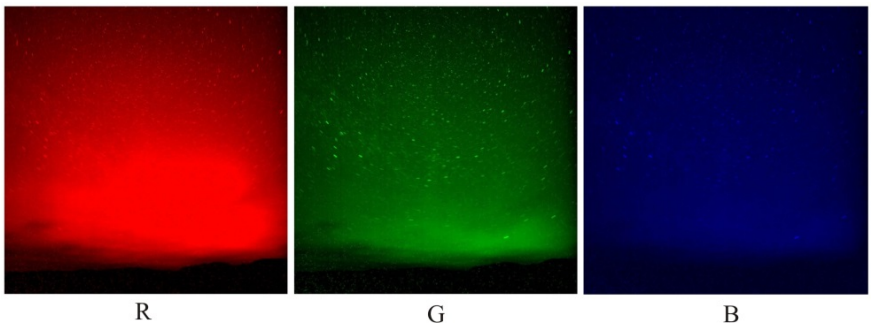


Рис. 232. Изображения полярного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г., полученные при ракурсных наблюдениях в ГФО ИСЗФ СО РАН, в RGB-каналах цветной камеры

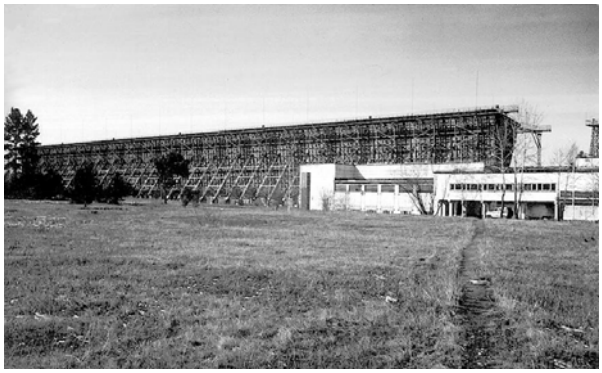
IV. При статистическом анализе влияния поверхностных волн (волн Рэлея) от различных землетрясений за период с 2011 по 2016 г. по данным ЛЧМ-ионозонда моностата.

Выполнен статистический анализ ионосферных эффектов для 28 землетрясений за период 2011–2016 гг. Анализ показал, что девять из них сопровождались вертикальными среднеширотными ионосферными неоднородностями. На примере глубокого Охотоморского землетрясения (24.05.2013 г.) было показано, что глубокофокусное землетрясение может привести к сильным ионосферным неоднородностям далеко от эпицентра.

V. При разработке методики наблюдений и анализа низкочастотных акустических колебаний в верхней атмосфере Земли инфразвуковым методом для сигналов, возбуждаемых в сейсмоактивном регионе Республики Бурятия.

VI. При анализе и сравнении условий возбуждения сейсмических и инфразвуковых сигналов при падении Челябинского метеороида 2013 г. и землетрясения умеренной силы 05.12.2014 (K=13.9) в районе оз. Хубсугул (МНР).

5.7. Обсерватория радиофизической диагностики атмосферы (ОРДА)



Обсерватория радиофизической диагностики атмосферы (ОРДА) ИСЗФ СО РАН расположена вблизи г. Усолье-Сибирское на территории одной из войсковых частей Министерства обороны РФ на удалении 125 км от г. Иркутска.

Задачами обсерватории являются проведение наблюдений на радиофизическом комплексе инструментов Института и обслуживание и модернизация научного оборудования, входящего в состав обсерватории.

Основные научные задачи обсерватории:

- регулярные наблюдения вариаций параметров ионосферы для различных времен суток, сезонов, уровней солнечной и геомагнитной активностей;
- наблюдение мощных когерентных отражений во время геомагнитных возмущений;
- наблюдение распространения волновых возмущений, приходящих из полярной области ионосферы;
- экспериментальные исследования распространения сложных ВЧ-сигналов с учетом дисперсионных искажений, рассеяния на неоднородностях и шероховатостях земной поверхности;
- наблюдение космических объектов.

Экспериментальная база ОРДА включает в себя ряд установок:

- Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) входит в перечень уникальных установок национальной значимости (рег. номер 01-28);
- многопозиционный ЛЧМ-ионозонд с передающими пунктами, размещенными на территории ОРДА (вертикального, возвратно-наклонного и наклонного зондирования), Норильской КМИС ИСЗФ СО РАН, в с. Забайкальское Хабаровского края и в п. Стекольный Магаданской обл. (наклонного зондирования) и приемными пунктами в ГФО ИСЗФ СО РАН (с. Торы, Республика Бурятия; п. Арти, Свердловская область), а также на Норильской КМИС (г. Норильск, Красноярский край);
- доплеровский комплекс ИСЗФ СО РАН с приемными комплексами, размещенными в лабораторном корпусе Института, ГФО и КМИО.

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР)

В период с января по декабрь 2016 г. в ОРДА был проведен ряд измерений как в штатном, так и в экспериментальных режимах. Штатный режим подразумевает измерения, проводимые с целью получения параметров ионосферной плазмы с использованием всех возможностей комплекса ИРНР (передающие и приемные устройства, накопление, обработка и хранение всего объема первичных данных). Помимо штатных наблюдений в ОРДА проводился ряд экспериментов, предназначенных для отработки новых методик и модернизации аппаратуры:

- долговременные испытания, отладка и тестирование системы синхронизации, предназначенной для обеспечения синхронного беспомехового функционирования ИРНР и РЛК «Воронеж», а также накопление статистических данных о взаимном влиянии двух комплексов с последующим анализом (совместно с ОАО РТИ им. А.Л. Минца);
- наблюдения за мерцанием звездных радиоисточников в пассивном режиме (фоновый риометр) с использованием нового широкополосного цифрового приемного устройства с улучшенным временным разрешением;
- совместные с Саянской солнечной обсерваторией (ССО) наблюдения за космическими объектами (КО) в синхронном режиме для отработки методов и алгоритмов определения параметров движения КО;
- регистрация длинной временной развертки для получения информации с диапазонов высот более 1200 км;
- подготовка к проведению экспериментов по разработке методик локации когерентного эха и проведения анализа его характеристик с использованием системы синхронизации ИРНР–РЛК;
- межведомственные испытания системы синхронизации ИРНР–РЛК.

Все периоды работы ИРНР приведены в табл. 10.

Таблица 10. Эксперименты, проведенные на УСУ ИРНР в 2016 г.

Период	Колличество суток	Эксперимент
19–21 января	3	наблюдения за космическими объектами совместно с ССО
21–25 января	5	пассивные наблюдения новым цифровым приемником (11 частот)
3–7 февраля	5	испытания системы синхронизации, набор статистики
24–29 февраля	6	испытания системы синхронизации, набор статистики
2–5 марта	4	испытания системы синхронизации, набор статистики
9 марта – 16 апреля	39	штатные наблюдения НР
19–21 апреля	3	экспериментальный режим: регистрация длинной развертки
1–13 мая	13	межведомственные испытания системы синхронизации ИРНР–РЛК

Общее время наблюдений в активном режиме — около 73 сут, общее время наблюдений в пассивном режиме — около 5 сут. В периоды времени, выделенные для проведения испытаний системы синхронизации, совместно с ОАО РТИ им. А.Л. Минца проводилось накопление статистических данных о взаимном влиянии двух радиолокационных комплексов с последующим анализом. Одновременно с этими экспериментами, а также во время штатных наблюдений НР велись работы по разработке методик локации когерент-

ного эха и проведения анализа его характеристик в количестве 425 ч. После завершения цикла предварительных испытаний системы синхронизации ИРНР–РЛК в мае 2016 г. были проведены межведомственные испытания. По окончании межведомственных испытаний выработано совместное решение о том, что система синхронизации испытания выдержала и рекомендована к применению.

В 2016 г. в ОРДА проводились следующие работы по модернизации оборудования ИРНР:

- в приемных устройствах ближнего (северного) терминала антенны модернизированы управляемые ключи для защиты входных усилителей во время синхронной работы ИРНР с РЛК с использованием современных радиоэлектронных компонентов;
- система управления ИРНР доработана для работы с системой синхронизации от РЛК;
- доработан блок контроля и регистрации всех служебных сигналов системы синхронизации с РЛК.

Многопозиционный ЛЧМ-зонд ИСЗФ СО РАН. Передающий комплекс

В период с 1 января 2016 г. по настоящее время на многопозиционном ЛЧМ-ионозонде «Ионозонд № 3» ОРДА (Усолье-Сибирское) проводились непрерывные эксперименты по вертикальному и слабонаклонному зондированию ионосферы.

В течение всего 2016 г. передающий пункт «Ионозонд № 3» ОРДА круглосуточно вел излучение на слабонаклонной трассе Иркутск–Торы (режим «Мониторинг», мощность излучения 15 Вт).

В течении 2016 г. на передающих комплексах многопозиционного ЛЧМ-ионозонда были проведены следующие мероприятия:

- ОРДА:
  – установка новой системы формирователя ЛЧМ-сигнала.
- Норильская КМИС:
  – ремонт и замена блоков ионозонда DPS-4;
  – ремонт и настройка усилительных блоков МО РПДУ «Кедр»;
  – ремонт источника питания +27В РПДУ «Кедр»;
  – установка новой системы формирователя ЛЧМ-сигнала;
  – демонтаж, ремонтные работы и монтаж передающей логопериодической антенны;
  – профилактика антенно-фидерного тракта передающей логопериодической антенны.
- Магадан:
  – модернизация системы автоматического запуска РПДУ «Кедр»;
  – ремонт и замена двигателя системы охлаждения РПДУ «Кедр»;
  – ремонт и настройка усилительных блоков МО РПДУ «Кедр»;
  – установка новой системы формирователя ЛЧМ-сигнала;
  – профилактика антенно-фидерного тракта передающей логопериодической антенны.
- Хабаровск:
  – ремонт и замена опорных частей фидерной линии;
  – очистка фидерной линии от насаждений и кустарников;
  – установка новой системы формирователя ЛЧМ-сигнала.
- ГФО:
  – модернизация передающего пункта «Моностат»;
  – модернизация системы сбора, обработки и передачи данных.

Приемный комплекс ЛЧМ-ионозонда

В течение 2016 г. на приемном пункте «Торы» в ГФО продолжался прием ЛЧМ-сигналов в мониторинговом режиме. Прием сигналов осуществлялся на наклонных трассах, входящих в институтскую сеть ЛЧМ-ионозондов, а также на трассах сторонних сетей.

Прием на наклонных трассах ведется с 5- и 15-минутным циклом. Основными наклонными трассами являются следующие: Магадан–Иркутск (с. Торы), Хабаровск–

Иркутск (с. Торы), Норильск–Иркутск (с. Торы). Частотный диапазон зондирования наклонных трасс составляет 4.0–30.0 МГц при скорости сканирования 500 кГц/с. Сведения о работе приемного комплекса многопозиционного ЛЧМ-ионозонда представлены в табл. 11.

Таблица 11. Сведения о работе приемного комплекса многопозиционного ЛЧМ-ионозонда.

Трасса	Количество сеансов	Количество сбоев	Количество ионограмм	Примечания (коэффициент потерь, %)
Магадан–Торы	77472	19206	58266	24.8
Хабаровск–Торы	129312	26031	103281	20.1
Норильск–Торы	77472	5036	72436	6.5
Усолье–Торы	391680	11322	390438	0.3
Моностат ВЗ	391680	11850	389910	0.5

Зарегистрированная информация доступна для внешнего пользования на сайте Института http://iszf.irk.ru.

6. НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

6.1. Общие сведения

В течение 2016 г. Институтом выполнялась научно-исследовательская работа по основным научным направлениям деятельности: современные проблемы астрономии, астрофизики и исследования космического пространства, включая физику Солнца, межпланетной среды, околоземного космического пространства, ионосферы и атмосферы; изучение солнечно-земных связей; развитие методов и аппаратуры исследований в области астрофизики и геофизики в соответствии с планом госзаданий на 2016 г. и согласно приоритетным направлениям Программы фундаментальных исследований государственных академий на 2013–2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 3 декабря 2012 г. № 2237-р.

1. Приоритетное направление II.12. Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений.

1.1. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.12.2. Радиофизические методы исследования верхней атмосферы и ионосферы. Распространение радиоволн (координатор — чл.-корр. РАН Потехин А.П.).

Проекты:

1.1.1. II.12.2.1. Развитие новых методов экспериментальных радиофизических исследований верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства (рег. номер 01201281660, руководитель проекта — к.ф.-м.н. Медведев А.В.).

1.1.2. II.12.2.2. Распространение радиоволн различных диапазонов в ионосфере Земли (рег. номер 01201281659, руководитель проекта — чл.-корр. РАН Потехин А.П.).

1.1.3. II.12.2.3. Исследование динамических процессов в магнитосфере и высокоширотной ионосфере Земли методом обратного рассеяния радиоволн коротковолнового диапазона (рег. номер 01201281658, руководитель проекта — к.ф.-м.н. Бернгардт О.И.).

2. Приоритетное направление II.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 исследова-

ний космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач.

2.1. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.1. Фундаментальные проблемы процессов космической погоды, включая процессы на Солнце, в межпланетной среде, магнитосфере и атмосфере Земли. Контроль и экология околоземного космического пространства (координатор — академик Жеребцов Г.А.).

Проекты:

2.1.1. II.16.1.1. Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климат (рег. номер 01201281657, руководитель проекта — академик Жеребцов Г.А.).

2.1.2. II.16.1.2. Изучение динамических процессов в системе нейтральная атмосфера–ионосфера–магнитосфера Земли (рег. номер 01201281656, руководитель проекта — д.ф.-м.н. Куркин В.И.).

2.1.3. II.16.1.3. Изучение волновых процессов и возмущений в околоземном космическом пространстве (рег. номер 01201281655, руководитель проекта — к.ф.-м.н. Климушкин Д.Ю.).

2.1.4. II.16.1.4. Исследование и мониторинг магнитосферно-ионосферных возмущений с использованием пространственно-разнесенных геофизических комплексов (рег. номер 01201281654, руководитель проекта — д.ф.-м.н. Рахматулин Р.А.

2.1.5. II.16.1.5. Развитие оптических и радиофизических методов в области астероидно-кометной опасности, техногенного засорения и экологии космического пространства (рег. номер 01201281653, руководитель проекта — к.ф.-м.н. Еселевич М.В.).

2.1.6. II.16.1.6. Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца (рег. номер 01201281652, руководитель проекта —Просовецкий Д.В.).

2.2. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.3. Физика Солнца и астрофизическое приборостроение (координатор — чл.-корр. РАН Григорьев В.М.).

Проекты:

2.2.1. II.16.3.1. Магнитные поля Солнца и природа солнечной активности (рег. номер 0120281651, руководитель проекта — д.ф.-м.н. Мордвинов А.В.).

2.2.2. II.16.3.2. Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере (рег. номер 01201281650, руководители проекта — д.ф.-м.н. Н.И. Кобанов, д.ф.-м.н. Алтынцев А.Т.).

2.2.3. II.16.3.3. Методы и инструменты астрофизического эксперимента (рег. номер 01201281648, руководитель проекта — д.ф.-м.н. Демидов М.Л., к.ф.-м.н. Лесовой С.В.).

2.3. Программа фундаментальных исследований СО РАН II.16.2. Физика космических лучей и солнечно-земных связей (координатор — чл.-корр. РАН Бережко Е.Г.).

Проект:

2.3.1. II.16.2.4. Диагностика межпланетной среды по данным наблюдений космических лучей (рег. номер 01201281649, руководитель проекта — к.ф.-м.н. Сдобнов В.Е.).

3. Программа Президиума РАН № 7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (координаторы — академик Зеленый Л.М., чл.-корр. Шустов Б.М.).

3.1. Проект «Фотометрические наблюдения и исследования нестационарных астрофизических объектов на телескопе АЗТ-33ИК» (руководитель проекта — чл.-корр. РАН Григорьев В.М.).

3.2. Проект «Радиоастрономические исследования динамических процессов в солнечной короне» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. Кузнецов А.А.).

3.3. Проект «Методы диагностики процессов солнечной активности и ее проявлений в ММП, магнитосфере и ионосфере Земли» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. Алтынцев А.Т.).

4. Программа Президиума РАН № 15 «Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики» (координатор — академик Лаверов Н.П.).

4.1. Проект «Исследование системы литосфера-атмосфера-ионосфера в экстремальных условиях» (руководитель проекта — д.ф.-м.н. Перевалова Н.П.).

5. Программа Президиума РАН № 23 «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика» (координатор — академик Рубаков В.А.).

5.1. Проект «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям» (руководитель проекта — к.ф.-м.н. Сдобнов В.Е.).

6. Программа Президиума РАН № 31 «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности. Фундаментальные исследования процессов горения и взрыва. Актуальные проблемы робототехники» (координаторы — академик Михайлов Ю.М., академик Левин В.А., академик Черноусько Ф.Л.).

6.1. Проект «Фундаментальные основы мониторинга и контроля околоземного космического пространства в оптическом диапазоне» (руководитель проекта — чл.-корр. РАН Григорьев В.М.).

6.2. Проект «Создание сегмента мониторинга уровня ионосферных помех в азиатском регионе России, связанных с естественными неоднородностями полярной ионосферы» (руководитель проекта — чл.-корр. РАН Потехин А.П.).

Институт работал по гранту Президента поддержки Ведущих научных школ НШ-6894.2016.5 «Экспериментальное и теоретическое исследование взаимосвязи динамических процессов в нижней и верхней атмосфере Земли» (научный руководитель — академик Жеребцов Г.А.).

В Институте выполнялись работы по гранту Российского научного фонда № 14-37-00027 «Разработка научно-технических основ мониторинга атмосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия в Арктической зоне с территории Российской Федерации» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Куркин В.И.).

В 2016 г. в Институте выполнялось 29 грантов РФФИ, из которых 7 грантов по отделу Физики и астрономии (3 молодежных гранта) и 22 грантов по отделу Наук о Земле (4 молодежных гранта, 2 гранта по соглашению РФФИ с зарубежными научными организациями).

8. 14-05-00080-а «Теоретическое и численное исследование развития локализованных возмущений в устойчиво стратифицированных течениях без точек перегиба на профиле скорости» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Чурилов С.М.).

9. 14-05-00578-а «Анализ реакции ионосферы на возмущения нейтральной атмосферы и магнитосферы на основе модели ГСМ ТИП и комплекса радиофизических инструментов ИСЗФ СО РАН» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Ратовский К.Г.).

10. 14-05-92002-М_2013 «Исследование динамики среднеширотной ионосферы на основе радиозатменных измерений COSMIC/FORMOSAT-3, данных радара некогерентного рассеяния, ионозондов и магнитных измерений» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Ратовский К.Г.).

11. 14-05-00259-а «Экспериментальное исследование возмущений в ионосфере над азиатским регионом России» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Куркин В.И.).

12. 14-05-00588-а «Исследование взаимодействия между магнитосферой, ионосферой и атмосферой с помощью СуперДАРН» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Магер П.Н.).

13. 14-45-04088-р_сибирь_а «Исследование пространственно-временной структуры неоднородностей электромагнитного поля Байкальской рифтовой зоны» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Рахматулин Р.А.).

14. 15-02-01089-а «Солнечные вспышки в микроволнах: от формирования токовых слоев до импульсной стадии» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Алтынцев А.Т.).

15. 15-02-03717-а «Исследование процессов ускорения частиц в солнечных вспышках на основе уникальных наблюдений гамма-спектрометра Конус-Винд и Сибирского солнечного радиотелескопа» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Кузнецов А.А.).

16. 15-02-01077-а «Исследование возникновения и движения корональных выбросов массы и связанных с ними ударных волн по многоволновым данным» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Файнштейн В.Г.).

17. 15-32-20504-а «Исследование трехмерной структуры атмосферы солнечных активных областей по результатам многоволновых наблюдений, моделирования и корональной сейсмологии» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Колобов Д.Ю.).

18. 15-05-05387-а «Развитие методов обработки данных Иркутского радара некогерентного рассеяния для исследования среднеширотной внешней ионосферы» (научный руководитель — академик Жеребцов Г.А.).

19. 15-05-02313-а «Экспериментальное исследование условий распространения внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере Земли по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Медведев А.В.).

20. 15-05-05561-а «Модель магнитосферных суббурь с новыми данными техники инверсии магнитограмм» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Мишин В.В.).

21. 15-05-05227-а «Исследование механизмов генерации волновых возмущений в средней атмосфере и эффектов этих волн в ионосфере» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Черниговская М.А.).

22. 15-05-03946-а «Исследование статистических и динамических характеристик мелкомасштабных неоднородностей ионосферы по данным экспериментального комплекса ИСЗФ СО РАН» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Ясюкевич Ю.В.).

23. 16-32-00268-мол-а «Поиск наблюдательных проявлений альфвеновских волн в атмосфере солнечных факелов» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Челпанов А.А.).

24. 16-32-00315-мол-а «Исследование вариаций магнитного поля, сопровождающих возникновение корональных выбросов массы, связанных с эрупцией волокна» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Егоров Я.И.).

25. 16-32-50172 «Моделирование микроволнового излучения нетепловых электронов из скрученных магнитных петель в солнечных вспышках» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Кузнецов А.А.).

26. 16-35-60018-мол-а-дк «Исследование комплексной структуры отклика ионосферы на события внезапных стратосферных потеплений в среднеширотном и арктическом регионах на основе данных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Полякова А.С.).

27. 16-32-00788-мол-а «Изучение эффекта Допплера в слабостационарном радиоканале Земля-ионосфера с помощью метода нормальных волн» (научный руководитель — Пензин М.С.).

28. 16-35-00027-мол-а «Исследование отклика ионосферы на одновременное воздействие различных источников в нейтральной атмосфере» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Полякова А.С.).

29. 16-32-00051-мол-а «Методика определения ионосферных параметров по данным одиночных станций ГЛОНАСС/GPS» (научный руководитель —Мыльникова А.А.).

30. 16-55-53003-ГФЕН-а «Особенности реакции ионосферы Восточно-Азиатского региона на геомагнитные возмущения» (научный руководитель — академик Жеребцов Г.А.).

31. 16-05-00254-а «Генерация азимутально-мелкомасштабных УНЧ-волн в земной магнитосфере высокоэнергичными частицами космической плазмы» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Климушкин Д.Ю.).

32. 16-05-00563-а «Исследование физических процессов формирования среднеширотных сияний в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Тащилин А.В.).

33. 16-05-00631-а «Влияние мелкомасштабной турбулентности солнечного ветра на состояние и волновую активность магнитосферно-ионосферной системы» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Потапов А.С.).

34. 16-05-01006-а «Исследование тонкой структуры коротковолнового рассеянного сигнала по данным когерентного декаметрового радара» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Бернгардт О.И.).

35. 16-35-50021-мол-нр «Исследование ионосферы с использованием данных глобальных и региональных спутниковых систем» (научный руководитель — д.ф.-м.н. Перевалова Н.П.).

36. РФФИ 16-05-01087-а «Исследование структуры и динамики зимней полярной стратосферы и связь ее циркуляции с гравитационными приливами» (научный руководитель — к.ф.-м.н. Шпынев Б.Г.).

Выполнялись следующие работы:

- по Мегапроекту — Создание Национального гелиогеофизического комплекса РАН (научный руководитель — академик Жеребцов Г.А.);
- прикладные по 10 темам в рамках хозяйственных договоров.

6.2. Деятельность ученого совета

Состав ученого совета Института был утвержден на Конференции научных работников Института 19.11.2015 г. В составе совета 31 человек. Председателем ученого совета является директор Института, чл.-к. РАН Потехин А.П.

В 2016 г. было проведено 11 заседаний ученого совета, где заслушивались научные сообщения, рассматривались отчеты и планы научно-исследовательских работ, проведения и участия в научных мероприятиях, утверждались темы диссертационных работ, научные руководители, отчеты по работе аспирантуры и др.

Научные доклады и сообщения, представленные на ученом совете:

1. Научный доклад «Ввод в действие многочастотного радиогелиографа ИСЗФ СО РАН» (докладчик — к.ф.-м.н. Лесовой С.В.).

2. Научный доклад — представление монографии Леонович А.С. и Мазур В.А. «Линейная теория МГД-колебаний магнитосферы» (докладчик — д.ф.-м.н. Леонович А.С.).

3. Научный доклад, посвященный 60-летию первых оптических наблюдений в ИСЗФ СО РАН и 40-летию ввода в действие Автоматизированного солнечного телескопа Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН (докладчики — чл.-корр. РАН Григорьев В.М., к.ф.-м.н. Машнич Г.П.).

4. Научный доклад «История радиоастрономии в Иркутске» (докладчик — д.т.н. Смольков Г.Я.

31 октября и 1 ноября ученым советом Института была организована научная сессия по итогам научно-исследовательской работы по проектам государственного задания 2016 г. Были заслушаны научные доклады с заключительными итоговыми отчетами по 13 базовым проектам за 2013–2016 гг. и промежуточными отчетами по 7 проектам программ Президиума РАН государственного задания. Были выдвинуты важнейшие результаты за 2016 г.

6.3. Деятельность диссертационного совета

Диссертационный совет Д.003.034.01 создан при Институте солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, приказом Рособрнадзора Министерства образования и науки РФ от 02.11.2007 г. № 2249-1351; срок его полномочий продлен приказом Рособрнадзора Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105нк.

Срок полномочий совета установлен на период действия «Номенклатуры специальностей научных работников», утвержденной приказом Минобрнауки России от 25.02.2009 г. № 59.

Диссертационному совету Д.003.034.01 разрешено принимать к защите диссертации по специальностям:

- 01.03.03 — физика Солнца, по физико-математическим наукам;
- 01.04.03 — радиофизика, по физико-математическим наукам;
- 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы, по физико-математическим наукам.

В 2016 г. проведено 10 заседаний совета и защищены четыре кандидатских диссертации.

1. Мячин Даниил Юрьевич. Структура и развитие внепятенных солнечных вспышек. Специальность 01.03.03 — физика Солнца.

2. Шиховцев Артем Юрьевич. Исследование оптической нестабильности земной атмосферы и условий коррекции солнечных изображений. Специальность 01.03.03 — физика Солнца.

3. Гркович Константин Владимирович. Моделирование характеристик сигнала среднеширотного когерентного эха по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния. Специальность 01.04.03 — радиофизика.

4. Щербаков Александр Анатольевич. Расчет скорости нейтральных ветров на ионосферных высотах по данным Иркутского радара НР. Специальность 01.04.03 — радиофизика.

6.4. Международное сотрудничество

В отчетном году состоялось 58 выездов (34 сотрудника) ИСЗФ СО РАН в 14 стран мира. Сотрудники Института приняли участие в 16 зарубежных научных мероприятиях (см. список зарубежных международных мероприятий), на которых представили 42 доклада: 2 приглашенных, 24 устных и 16 стендовых.

Таблица 12. Заграничные командировки сотрудников Института

Страна	Сроки	Фамилия	Научная работа	Зарубежное международное мероприятие, тип доклада
Австрия	26.07–30.07	Кашапова Л.К.		1 устный
Бельгия	14.07–11.08	Кашапова Л.К.	+	
Болгария	04.06–12.06	Медведева И.В.		1 устный + 1 стендовый
	04.06–12.06	Ратовский К.Г.		1 устный + 1 стендовый
	04.06–12.06	Черниговская М.А.		1 устный
	04.06–12.06	Шпынев Б.Г.		1 стендовый
Великобритания	01.02–01.04, 01.05–31.05	Кузнецов А.А.	+	
	25.02–28.03, 05.05–01.06	Глоба М.В.	+	
	25.02–28.03	Кашапова Л.К.	+	
	15.03–15.05	Дерес А.С.	+	
	15.04–14.05	Афанасьев А.Н.	+	
	21.09.15–21.09.17	Анфиногентов С.А.	+	
Италия	11.09–19.09	Демидов М.Л.		1 устный + 1 стендовый
Казахстан	25.09–01.10	Кравцова М.В.		
	25.09–01.10	Луковникова А.А.		
Китай	29.02–25.04	Сыч Р.А.	+	2 устных
	13.06–27.06, 27.11–03.12	Демидов М.Л.	+	
	13.06–27.06	Киселев А.В.	+	

	25.07–07.08	Мыльникова А.А.		2 стендовых
	25.07–07.08	Полякова А.С.		1 устный + 1стендовый
	25.07–07.08	Ясюкевич Ю.В.		1 устный + 2 стендовых
	23.11–26.11	Ратовский К.Г.	+	
Монголия	05.09–10.09	Ларюнин О.А.		1 устный
	05.09–10.09	Ткачев А.Д.		1 стендовый
	05.09–10.09	Ткачев И.Д.		1 устный
Польша	05.05–22.05	Иванов Е.Ф.	+	
	05.05–22.05	Киселев В.И.	+	
	05.05–22.05	Кобец В.С.	+	
	16.05–22.05	Дерес А.С.	+	
Тайвань	09.10–16.10	Алсаткин С.С.	+	
	09.10–16.10	Медведева И.В.	+	
	09.10–16.10	Ратовский К.Г.	+	
	09.10–16.10	Рахматулин Р.А.	+	
	09.10–16.10	Щербаков А.А.	+	
Франция	12.06–21.06	Кузнецов А.А.		2 устных
Хорватия	22.09–03.10	Афанасьев А.Н.		1 устный
	22.09–03.10	Мышьяков И.И.		1 устный
	24.09–03.10	Егоров Я.И.		1 устный
	24.09–03.10	Челпанов А.А.		1 устный
Чешская Республика	18.02–18.03, 15.05–30.05	Муратова Н.О.	+	1 устный
	18.04–30.05	Мешалкина Н.С.	+	1 устный
	29.04–29.05	Кашапова Л.К.	+	1 устный + 2 стендовых
	05.05–30.05	Киселёв В.И.	+	1 стендовый
	10.05–31.05	Алтынцев А.Т.	+	1 приглашенный
	13.05–31.05	Мышьяков И.И.		1 устный
	13.05–01.06	Сыч Р.А.	+	1 устный
	15.05–07.06	Афанасьев А.Н.	+	1 приглашенный
	17.05–27.05	Кузнецов А.А.		1 устный
	17.05–02.06	Челпанов А.А.		1 стендовый
	17.05–02.06	Челпанов М.А.		1 стендовый
	22.05–29.05	Дерес А.С.		1 устный
	22.05–30.05	Иванов Е.Ф.	+	
	22.05–30.05	Кобец В.С.	+	1 стендовый
Япония	18.11–26.11	Демидов М.Л.	+	

Загранкомандировки для совместной работы в рамках международных проектов

С 1 февраля по 1 апреля, а также с 1 по 31 мая зав. лаб. д.ф.-м.н. Кузнецов А.А. был командирован в университет Глазго (г. Глазго, Великобритания). Командировка была организована для совместной научно-исследовательской работы в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Основным направлением работы в ходе поездок было исследование солнечного радиоизлучения по данным инструмента LOFAR. Для исследования был выбран всплеск IV типа, наблюдавшийся 20 июня 2015 г. Сделан вывод, что излучение генерировалось в расширяющейся скрученной магнитной петле; ускоренные частицы, по всей видимости, генерировались за счет магнитного пересоединения в этой петле. Кроме того, обсуждались вопросы моделирования радиоизлучения из скрученных магнитных трубок в солнечной короне. Во время командировки с 1 по 31 мая Кузнецов А.А. участвовал в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 18 февраля по 18 марта и с 15 по 30 мая инженер-электроник Муратова Н.О. была командирована в обс. Ондржеёв (Чешская Республика) для выполнения научно-исследовательских работ в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Цели командировок – участие в обучающем семинаре по формированию запросов для получения данных наблюдений с ALMA при помощи ALMA Observing Tool; проведение совместных обсуждений по поводу создания нового спектрографа для Астрономического института Ондржеёв; выступление на семинаре с отчетом о результатах разработки нового солнечного спектрополяриметра в урочище Бадары; изучение существующих радиоспектрографов, расположенных на территории обсерватории Астрономического института. Кроме того, 14 марта Муратова Н.О. приняла участие в качестве слушателя в Spring Interdepartmental Meeting 2016, где было представлено 5 научных докладов. Во время командировки Муратова Н.О. участвовала в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 25 февраля по 28 марта с.н.с. к.ф.-м.н. Кашапова Л.К. и аспирантка Глоба М.В. были командированы в Университет г. Глазго, Великобритания. Цель поездки — выполнение научно-исследовательских работ по международному гранту 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Совместно с сотрудниками группы Астрономии и астрофизики было проведено усовершенствование методов восстановления изображений на основе солнечных наблюдений Иркутского радара некогерентного рассеяния. Удалось показать, что солнечные наблюдения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния позволяют получать полноценные изображения Солнца на частоте 162 МГц. Кроме того, был проведен анализ солнечной вспышки 29 июня 2012 г. и получены численные параметры, описывающие данное событие.

С 29 февраля по 25 апреля зам. директора к.ф.-м.н. Сыч Р.А. был командирован в Юньнаньскую астрономическую обсерваторию КАН (г. Куньмин, КНР) для выполнения научно-исследовательских работ по программе ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг. II.16.3.2. «Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере» и в рамках международного гранта “CAS President’s International Fellowship Initiative. Grant No. 2015VMA014”. Работа проводилась по программе «Исследование колебательных и нестационарных явлений в солнечной атмосфере» совместно с исследовательской группой профессора Ванг Мин (Wang Min). Впервые были получены двумерные изображения волновых процессов в магнитных структурах на различных пространственных масштабах.

Волновые процессы связаны с кратковременным энерговыделением вспышек в тени. Кроме того, в ходе работ Сыч Р.А. представил устные доклады на международных семинарах по солнечной физике, которые проводились в г. Личжян и Даоченг.

С 15 марта по 15 мая инженер-исследователь Дерес А.С. была командирована в университет Уорика, г. Ковентри, Великобритания для выполнения научно-исследовательских работ в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). В ходе совместных работ была разработана модель распространения 3-минутных колебаний в корональном фане с холодной центральной частью. С помощью кода FoMo и параметров моделирования были получены синтетические изображения атмосферы Солнца над пятном. С 16 по 22 мая Дерес А.С. находилась в Польше (университет им. М. Кюри-Склодовской, г. Люблин и Вроцлавский университет, г. Вроцлав), где выступила на семинарах. Кроме того, во время командировки Дерес А.С. приняла участие в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 15 апреля по 14 мая к.ф.-м.н. Афанасьев А.Н. был командирован в университет Уорика, г. Ковентри, Великобритания для выполнения научно-исследовательских работ по программе ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг. II.16.1.6. «Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца» и международному гранту 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Во время командировки была продолжена работа над построением теоретической модели распространения продольных волн в корональных магнитоплазменных структурах, а также проводилось численное моделирование распространения медленных МГД-волн над солнечной активной областью. Результаты моделирования использовались Анфиногентовым С.А. (ИСЗФ СО РАН, университет Уорика) для получения двумерных синтетических изображений солнечной короны. С 15 мая по 7 июня Афанасьев А.Н. находился в Чешской Республике, где принял участие в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице.

С 18 апреля по 30 мая с.н.с. к.ф.-м.н. Мешалкина Н.С. была командирована в обсерваторию Ондржеёв (Чешская Республика) для проведения работы в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Основным направлением работы в командировке был анализ событий, представляющих интерес для решения задач проекта, в первую очередь, с субсекундными импульсами и колебаниями, которые наблюдались одновременно инструментами Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ. Совместно с чешскими коллегами был подготовлен устный доклад для участия в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 29 апреля по 29 мая с.н.с. к.ф.-м.н. Кашапова Л.К. была командирована в обсерваторию Ондржеёв (Чешская Республика). Цель поездки — выполнение научно-исследовательских работ по международному гранту 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Основным результатом, полученным в результате совместных исследований, является применение методики обнаружения плазменного механизма во вспышечном излучении. Были продолжены также совместные исследования процессов ускорения частиц на ранних стадиях солнечных вспышек и проведено совершенствование методов диагностики механизмов генерации излучения в солнечных вспышках. По результатам исследования был подготовлен устный доклад, представленный на V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 5 по 30 мая м.н.с. Иванов Е.Ф., м.н.с. Киселев В.И. и инженер-исследователь Кобец В.С. были командированы в университет им. М. Кюри-Склодовской (г. Люблин, Польша) для выполнения научно-исследовательских работ в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Во время командировки Киселев В.И. и Иванов Е.Ф. выступили на семинарах в университете им. Марии Склодовской-Кюри (г. Люблин, Польша) и в Астрономическом институте (г. Вроцлав, Польша) с докладами. Были представлены результаты работы по созданию многоволнового радиогелиографа, возможности нового инструмента, примеры получаемых инструментом данных. Был прослушан цикл лекций Криса Муравски «Numerical methods for MHD waves in the solar atmosphere». Кроме того, во время командировки Иванов Е.Ф., Киселев В.И. и Кобец В.С. участвовали в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 5 мая по 1 июня аспирантка Глоба М.В. была командирована в университет г. Глазго, Великобритания, для выполнения научно-исследовательских работ по международному гранту 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Было проведено усовершенствование методов построения изображений Солнца на основе пассивных наблюдений Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). Было показано хорошее согласие для изображений как спокойного Солнца, так и шумовых радиобурь; получены на ИРНР и гелиографе Нанси во время близких по времени наблюдений в 2012 г. Кроме того, Глоба М.В. участвовала в проведении семинара на тему исследования ионосферных неоднородностей с помощью наблюдения ионосферных мерцаний дискретных радиоисточников в лаборатории Резерфорда–Эпплтона, Оксфордшир.

С 10 по 31 мая науч. рук. направления, д.ф.-м.н. Алтынцев А.Т. был командирован в обсерваторию Ондржеёв (Чешская Республика) для проведения работы в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Цели поездки — обсуждение совместных наблюдений на многоволновых радиогелиографах СРГ (Республика Бурятия) и китайском MUSER (Внутренняя Монголия); обсуждение события 4 августа 2011 г. с тонкой временной структурой и колебаниями, зарегистрированными одновременно спутниками SDO, RHESSI, 10-элементным прототипом, спектрополяриметрами 2-24 ГГц, Сибирским солнечным радиотелескопом; участие в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 13 мая по 1 июня зам. директора к.ф.-м.н. Сыч Р.А. был командирован в Астрономический институт АН Чешской Республики с целью выполнения научно-исследовательских работ по международному гранту 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Кроме того, во время командировки Сыч Р.А. участвовал в V Международном рабочем совещании по проекту RadioSun (RadioSun-5), проходившем с 23 по 27 мая в г. Ческе Будеёвице (Чешская Республика).

С 13 по 27 июня зам. директора д.ф.-м.н. Демидов М.Л. и инженер Киселев А.В. с 27 ноября по 3 декабря зам. директора д.ф.-м.н. Демидов М.Л., были командированы в Китай (Солнечная наблюдательная станция Хуайроу (HSOS)) для проведения совместных работ в рамках российско-китайского гранта РФФИ ГФЕН 15-52-53125 ГФЕН_а «Эволюция магнитного поля на Солнце и его спиральности в 22-летнем цикле: систематические долговременные наблюдения и теоретические модели» (руководитель: Кузанян К.М., ИЗМИРАН, г. Москва). В ходе второго визита в рамках данного гранта российской делегации в Китае были продолжены работы, начатые во время первого визита (октябрь–ноябрь 2015 г.). Показано, что в результате применения сотрудниками HSOS рекоменда-

ций, данных российскими коллегами во время первого визита (заменить поляризатор в анализаторе поляризации АП), качество данных SMAT значительно улучшилось. Дополнительно показано, что применение рекомендованной методики контроля нулевого уровня с помощью полуволновой фазовой пластинки, вводимой в пучок света перед АП, позволяет существенно улучшить данные магнитограмм.

С 14 июля по 11 августа с.н.с. к.ф.-м.н. Кашапова Л.К. была командирована в Лёвенский католический университет (Бельгия). Цель поездки — проведение совместных исследований, подготовка совместных презентаций и работа над совместной публикацией, представленной на совещании 15th RHESSI Workshop, который проходил с 26 по 30 июля в г. Грац (Австрия).

С 9 по 16 октября н.с. Алсаткин С.С., с.н.с. к.ф.-м.н. Медведева И.В., зав. лаб. к.ф.-м.н. Ратовский К.Г., зав. обс. д.ф.-м.н. Р.А. Рахматулин, н.с. Щербаков А.А. были командированы в Национальный центральный университет и Национальный университет Чень-Кунь (Тайвань). Визит состоялся в рамках совместного проекта «Исследование динамики среднеширотной ионосферы на основе радиозатменных измерений COSMIC/FORMOSAT-3, данных радара некогерентного рассеяния, ионозондов и магнитных измерений». На семинарах университетов было представлено два устных доклада, а также проведено обсуждение итоговых результатов заканчивающегося проекта и выработаны перспективы дальнейших совместных исследований.

С 23 по 26 ноября зав. лаб. к.ф.-м.н. Ратовский К.Г. был командирован в Национальный центр космических исследований КАН (НЦКИ КАН). Цель визита — проведение совместных работ в рамках гранта РФФИ № 16-55-53003_ГФЕН_а «Особенности реакции ионосферы Восточно-Азиатского региона на геомагнитные возмущения». На семинаре НЦКИ КАН был представлен устный доклад «Появляемость среднеширотного F-рассеяния по данным иркутского ионозонда (Mid-latitude F-spread occurrence statistics from Irkutsk DPS-4 data)». Проведено сравнение методик исследования F-рассеяния в ИСЗФ СО РАН и НЦКИ КАН. Выработаны планы ближайших совместных публикаций, обсуждены планы дальнейших совместных исследований и ближайших визитов в ИСЗФ СО РАН и НЦКИ КАН. Разработана программа использования данных наблюдений на ионозондах, расположенных в Иркутске, Норильске и на о. Хайнань.

С 18 по 27 ноября зам. директора д.ф.-м.н. Демидов М.Л. был командирован в Национальную астрономическую обсерваторию (Япония) для проведения совместных работ в рамках российско-японского гранта «Нарушение симметрии в магнитогидродинамической турбулентности как источник солнечной активности: наблюдательные и теоретические аспекты» (руководитель: Кузанян К.М., ИЗМИРАН, г. Москва). В ходе визита было проведено ознакомление с работой нового инфракрасного магнитографа полного диска IRmag, установленного на территории обсерватории Японии и способного регистрировать все четыре параметра Стокса одновременно в нескольких спектральных линиях в двух спектральных диапазонах. Кроме того, Демидов М.Л. выступил с докладом о наблюдениях магнитных полей на телескопе СТОП ССО и о полученных на их основе основных научных результатах.

С 21 сентября 2015 г. по 21 сентября 2017 г. н.с. Анфиногентов С.А. командирован в университет Уорика (г. Ковентри, Великобритания) для выполнения совместных научно-исследовательских работ по контракту в рамках гранта ERC-AG «МГД волновая диагностика солнечной атмосферы» и реализации проекта II.16.3.2 «Нестационарные волновые процессы в солнечной атмосфере».

Международные проекты

Проект в рамках межакадемических соглашений о научном сотрудничестве между РАН и АН Болгарии в области фундаментальных космических исследований «Исследование оптических проявлений в средней и верхней атмосфере Земли магнитосферно-

атмосферных явлений при гелиогеофизических возмущениях на основе наземных и спутниковых наблюдений». Координаторы — д-р Пенка Влайкова Стоева, Институт космических исследований и технологии, БАН (г. Старая Загора, Болгария); зав. лаб. д.ф.-м.н. Михалев А.В., ИСЗФ СО РАН. Сроки 2014–016 гг.

В 2016 г. в рамках проекта с целью исследования динамики верхней атмосферы анализировались результаты фотометрии ночной атмосферы с применением цветной ПЗС-камеры с учетом собственного излучения верхней атмосферы и особенностей его спектрального состава. Использовались данные наблюдений свечения ночной атмосферы за 2010–2015 гг. в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН камерой с охлаждаемой цветной ПЗС-матрицей KODAK KAI-11002. Указаны геофизические явления, имеющие оптические проявления в R-, G-, B-каналах цветной камеры. Указана возможность для некоторых геофизических явлений (геомагнитные бури, внезапные зимние стратосферные потепления) количественно связывать увеличение сигналов по G- и R-каналам с увеличением интенсивностей дискретных эмиссий 557.7 и 630.0 нм, являющихся доминирующими в спектре собственного излучения верхней атмосферы.

Международный грант 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). Координатор программы — проф. Накаряков В.М., университет Уорика (г. Ковентри CV4 7AL, Великобритания); координатор от ИСЗФ СО РАН — зам. директора к.ф.-м.н. Сыч Р.А. Сроки: июнь 2012 г. — июнь 2016 г.

В осуществлении проекта принимают участие 7 научных организаций: 2 российские и 5 зарубежных. Членами коллектива ИСЗФ СО РАН по проекту RADIOSUN в 2016 г. проведены экспериментальные и теоретические исследования источников волновых возмущений среды в солнечной атмосфере. Анализ гелиосейсмологических измерений частоты отсечки колебаний по всему объему атмосферы активной области впервые позволил установить общие закономерности распространения волн с подфотосферных слоев в корону. Показана важная роль механизма частотного обрезания в формировании пространственного распределения источников колебаний в активных областях. Предложены альтернативные методы исследования структуры магнитного поля с использованием гелиосейсмологических результатов. Исследована динамика распространяющихся волновых фронтов с использованием разработанного метода попиксельной вейвлет-фильтрации. Проведен анализ параметров колебаний с высотой. Идентифицированы как кинк-мода незатухающие поперечные колебания высоких петель, видимые в ультрафиолетовых линиях. Рассмотрена возможность инициации вспышечного энерговыделения МГД-волнами, проникающими из области пятен в область вспышки вдоль магнитных волноводов. Уделено внимание процессам усиления волновой активности в пятнах перед началом вспышки. Показана возможность модуляции вспышечного энерговыделения. Разработана теоретическая модель на основе подфотосферного низкочастотного резонатора.

Инициативный научный проект РФФИ — Национальный научный комитет в Тайбэй (Тайвань) (конкурс «ННС_а» 2014) 14-05-92002 «Исследование динамики среднеширотной ионосферы на основе радиозатменных измерений COSMIC/FORMOSAT-3, данных радара некогерентного рассеяния, ионозондов и магнитных измерений». Координаторы — в.н.с. к.ф.-м.н. Ратовский К.Г., ИСЗФ СО РАН; адъюнкт-профессор Чарльз Лин, Национальный университет Чэн Кун. Сроки: 2014–2016 гг.

В рамках проекта в 2016 г. проведен сравнительный анализ различных методов получения ионосферного профиля электронной концентрации (метода радиозатменных измерений COSMIC/FORMOSAT-3, метода некогерентного рассеяния и метода вертикального зондирования ионосферы). Между характеристиками нижней части ионосферы, полученными различными методами, практически отсутствует систематическое расхождение, а среднеквадратичная ошибка меняется от 10 до 20 % в зависимости от уровня солнечной активности. Между характеристиками верхней части ионосферы, полученными методом некогерентного рассеяния и методом радиозатменных измерений, существует

систематическое расхождение, сравнимое со среднеквадратичной ошибкой. Данные, полученные методом радиозатменных измерений, систематически превышают данные метода некогерентного рассеяния. Систематическое различие между методами приблизительно в два раза меньше, чем систематическое различие между прогнозом модели IRI и данными радара некогерентного рассеяния. Причины систематического превышения, возможно, связаны с региональными особенностями ионосферы. Проведено исследование магнитосферно-ионосферного взаимодействия на низких широтах во время сильной геомагнитной бури 14–16 декабря 2006 г. Данные спутников NOAA/POES были использованы для идентификации усиления потоков запрещенных энергичных электронов (квазизахваченных электронов, потоки которых усиливаются в запрещенной зоне). Для исследования положительных фаз ионосферных бурь использовались глобальные ионосферные карты и радиозатменные измерения COSMIC/FORMOSAT-3. Было обнаружено, что продолжительные положительные фазы ионосферных бурь сопровождались усилениями потоков запрещенных энергичных электронов. В результате исследований сделан вывод о том, что прямая ионизация во внешней ионосфере квазизахваченными энергетическими электронами может давать существенный вклад в формирование положительных фаз ионосферных бурь, длящихся более 24 часов от начальной и главной фаз до фазы восстановления.

Инициативный научный проект РФФИ – Государственный фонд естественных наук Китая (ГФЕН) № 16-55-53003_ГФЕН_а «Особенности реакции ионосферы Восточно-Азиатского региона на геомагнитные возмущения». Координаторы — советник РАН акад. Г.А. Жеребцов, ИСЗФ СО РАН; профессор Ши Цзянькуи, Национальный центр космических исследований КАН. Сроки: 2016–2017 гг.

В рамках данного проекта в 2016 г. исследован отклик ионосферы высоких, средних и низких широт на интенсивные геомагнитные бури, наблюдавшиеся в разные сезоны в 2012–2015 гг. Использованы данные измерений на сети ионосферных станций, расположенных в долготном секторе 90–150° E. Анализ экспериментальных данных позволил выявить ряд особенностей отклика ионосферы на бури. Моделирование показало, что на субавроральных и авроральных широтах отклик ионосферы контролируется как возмущениями в составе нейтральной атмосферы, так и магнитосферными источниками; на средних широтах — главным образом, возмущениями в составе нейтральной атмосферы и термосферным ветром. На низких широтах продолжительные отрицательные возмущения обусловлены изменением глобальной ветровой циркуляции и в меньшей степени изменениями в составе термосферы, а также проникновением электрических полей на низкие широты, вследствие чего экваториальная аномалия на фазе восстановления не сформировалась. На основе данных вертикального зондирования ионосферы, полученных на ст. Хайнань (19° N, 109° E), обнаружено, что суточные вариации высоты максимума, полученные на этой станции, характеризуются многопиковой структурой с 4 локальными максимумами зимой (полдень, полночь, ранее утро, поздний вечер), 3 локальными максимумами в период равноденствия (полдень, полночь, ранее утро) и 2 локальными максимумами летом (полдень, полночь). Результаты моделирования показали, что электромагнитный дрейф и термосферный ветер являются важными управляющими процессами в формировании низкоширотной ионосферы. Многопиковая структура суточных вариаций высоты максимума над станцией Хайнань обусловлена многопиковой структурой суточного хода электромагнитного дрейфа и термосферного ветра, которые, в свою очередь, имеют ярко выраженные сезонные вариации. На основе данных ионозондов, расположенных вблизи меридиана 120° E, выполнен сравнительный анализ ионосферных возмущений, наблюдавшихся в ходе интенсивных геомагнитных бурь в декабре 2006 г. и декабре 2015 г. Обсуждались возможные процессы, которые управляли распределением концентрации электронов во время этих бурь.

Инициативный научный проект РФФИ — Государственный фонд естественных наук Китая (ГФЕН) № 15-52-53125 ««Эволюция магнитного поля на Солнце и его спиральности в 22-летнем цикле: систематические долговременные наблюдения и теоретические

модели». Координаторы — Кузанян К.М., ИЗМИРАН, г. Москва; Чжан Х., Солнечная наблюдательная станция Хуайроу, Национальные астрономические обсерватории Китая КАН. Сроки: 2015–-2016 гг.

Основным результатом работы соисполнителей из ИСЗФ СО РАН в 2016 г. является проведение совместных наблюдений с китайскими коллегами на солнечных векторных магнитографах в Хуайроу (Пекин): полнодисковом и вектор-магнитографе активных областей. Были выполнены также перекрестные наблюдения в различных поляризациях и установлены взаимные соответствия нулевого уровня продольного магнитного поля по различным инструментам. Проведено сравнение с вектор-магнитографом СТОП Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН. Выполнена обработка данных долговременных изменений пятен, что позволило получить информацию о соотношении мелкомасштабной и крупномасштабной компонент магнитной активности на основе турбулентного динамо. Получены важные спиральные характеристики биполярных магнитных областей, связанные с их систематической закрученностью (наклоном), и проведен анализ полученных закономерностей, проявляющихся в солнечном цикле.

Инициативный научный проект РФФИ — Японское общество продвижения науки (ЯФ_а) № 16-52-50077 «Нарушение симметрии в магнитогидродинамической турбулентности как источник солнечной цикличности: наблюдательные и теоретические аспекты». Координаторы — Кузанян К.М., ИЗМИРАН, г. Москва; Ёкои Н., Институт индустриальных наук, Университет Токио. Сроки: 2016–2017 гг.

В рамках проекта соисполнителями из ИСЗФ СО РАН в 2016 г. выполнен анализ динамики магнитного поля и течений плазмы на начальной стадии появления малых активных областей в фотосфере Солнца. Обнаружен мощный подъем фотосферной плазмы при появлении двух малых активных областей NOAA 9021 и NOAA 10768. Параметры усиленных восходящих течений согласуются с параметрами аналогичных течений в большой активной области NOAA 10488. Сравнение между наблюдениями и численным моделированием выхода магнитных потоков [Toriumi et al., 2011] показало хорошее качественное согласие. Найдено, что движущей силой восходящих течений плазмы сначала является градиент давления газа, а затем — градиент магнитного давления.

Объединенный Российско-Китайский научный центр по космической погоде

Объединенный Российско-Китайский научный центр по космической погоде (ОНЦ-КП) был создан в 2000 г. Институтом солнечно-земной физики СО РАН и Центром космической науки и прикладных исследований КАН (с 2010 г. — Национальный центр космических исследований КАН (НКЦИ КАН)).

В рамках работы Центра проводились совместные исследования по проектам РФФИ №16-55-53003 и РФФИ №15-52-53125. Очередная XIII Российско-Китайская конференция по космической погоде проведена в августе 2016 г. в г. Якутске (на базе Института космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН). В работе конференции приняли участие 83 ученых и специалиста, среди которых 34 представителя шести научных организаций Китая (НКЦИ КАН, Институт геологии и геофизики КАН, Национальные астрономические обсерватории Китая, Научно-технический университет Китая, Институт атмосферной физики КАН, Пекинский университет) и 10 участников из двух научных организаций России (ИСЗФ СО РАН, ПГИ РАН).

Заседания семинара проходили в рамках 6 секций: 1) нестационарные процессы на Солнце, приводящие к геоэффективным явлениям; 2) распространение в межпланетном пространстве и эволюция структурных образований, вызванных возмущениями на Солнце; 3) магнитосферный отклик на возмущения в межпланетной среде; 4) процессы в ионосфере, верхней и средней атмосфере, обусловленные регулярными и спорадическими возмущениями солнечного ветра; 5) мониторинг и прогноз космической погоды; 6) воздействие

космической погоды на человека и его среду обитания. На конференции было представлено 99 докладов (61 устный, 38 стендовых).

В ходе конференции обсуждались планы дальнейшей работы ОНЦ-КП, а также вопросы расширения международного сотрудничества России и Китая в области исследования влияния солнечной активности на космическую погоду в околоземном космическом пространстве.

Визиты зарубежных ученых в ИСЗФ СО РАН

С 6 января по 1 февраля научный сотрудник Николя Биан из Школы физики и астрономии университета (г. Глазго) посетил Институт для проведения совместных научно-исследовательских работ в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). За время пребывания в ИСЗФ СО РАН он выступил с докладом на семинаре отдела радиоастрофизики и провел обсуждение роли турбулентности в магнитной плазме солнечных вспышек. Совместно с сотрудниками отдела радиоастрофизики ИСЗФ СО РАН Биан Н. выполнил научные исследования, направленные на изучение процессов ускорения частиц в солнечных вспышках. Помимо научной работы, Биан Н. прочитал научно-популярную лекцию о Солнце в областной библиотеке им. Молчанова-Сибирского.

С 21 апреля по 1 мая Институт посетили научные сотрудники Мирослав Барта и Ивица Скокич из Астрономического института Академии наук Чешской Республики. Цель визита — проведение совместных научно-исследовательских работ в рамках международного гранта 7-й рамочной программы Европейского Союза по международному обмену сотрудников научных учреждений (PIRSES-GA-2011-295272, RADIOSUN, Radiophysics of the Sun). За время пребывания в ИСЗФ СО РАН Скокич И. выступил с докладом на семинаре отдела Радиоастрофизики, а Барта М. прочитал научно-популярную лекцию о Солнце в областной библиотеке им. Молчанова-Сибирского. Совместно с сотрудниками отдела радиоастрофизики ИСЗФ СО РАН они провели обсуждение возможных совместных проектов с использованием радиогелиографа АЛМА. Они посетили Радиоастрофизическую обсерваторию ИСЗФ СО РАН, ознакомились с результатами, полученными на модернизированном многоволновом радиогелиографе и обсудили возможности использования пакета CASA для обработки новых наблюдений.

С 18 по 21 июля в Институте с визитом находились научные сотрудники Института исследований околоземного космического пространства (университет г. Нагоя, Япония) Кадзуо Шиокава и Нозому Нишитани. В ходе визита обсуждались возможности проведения совместных исследований в рамках проекта PWING, который осуществляется университетом г. Нагоя с целью изучения взаимодействия волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли. Кроме того, проведено обсуждение вопросов организации международного симпозиума VarSITI («Переменность Солнца и его воздействие на Землю») в Иркутске в 2017 г.

С 4 по 26 августа научный сотрудник Аркадиуш Берлицки из Астрономического института Вроцлавского университета (Польша) посетил Институт с целью установления научных связей и обсуждения планов по будущему научно-техническому сотрудничеству. За время пребывания в ИСЗФ СО РАН Берлицки А. выступил с докладом на российско-китайском семинаре (20 августа), а также посетил Радиоастрофизическую обсерваторию ИСЗФ СО РАН и ознакомился с результатами, полученными на инструментах обсерватории.

С 15 по 25 августа Институт посетил научный сотрудник ШинТориуми из Национальной астрономической обсерватории Японии. Цель визита — совместная работа в рамках проекта РФФИ — Японское общество продвижения науки (ЯФ_а) № 16-52-50077. Во время совместной работы обсуждались различные теоретические и наблюдательные аспекты всплытия магнитных потоков на Солнце, проводилось сопоставление результатов их теоретической модели с нашими наблюдательными данными. В ходе визита Шин То-

риуми сделал доклад о магнитных свойствах вспышечных активных областей на Солнце и посетил Байкальскую астрофизическую обсерваторию.

Институт посетила китайская делегация, в которую вошли представители Института атмосферной физики КАН, Института геологии и геофизики КАН, Национального центра космических исследований КАН, Пекинского университета и Научно-технического университета Китая. Цель визита — развитие сотрудничества между научными сотрудниками академий наук России и Китая, обсуждение новых областей для совместных исследований. В ходе визита была сделана презентация Института и проведена научная сессия с участием китайских и российских ученых. Кроме того, генеральный консул КНР в г. Иркутске г-н Цао Юньлун вручил академику Жеребцову Г.А., присужденную в 2012 г., Премию КНР за научно-техническое сотрудничество.

Таблица 13. Визит в ИСЗФ китайской делегации 20 августа 2016 г.

№	Фамилии, имена	Научное учреждение
1	Lu Gaopeng (Лю Гаопэн)	Институт атмосферной физики КАН
2	Chen Yiding (Чэнь Идин)	Институт геологии и геофизики КАН
3	Luo Hao (Ло Хао)	Институт геологии и геофизики КАН
4	Rong Zhaojin (Жун Чжаоцзинь)	Институт геологии и геофизики КАН
5	Wei Yong (Вэй Юн)	Институт геологии и геофизики КАН
6	Ding Feng (Дин Фэн)	Институт геологии и геофизики КАН
7	Le Huijun (Лэ Хуэйцзюнь)	Институт геологии и геофизики КАН
8	Jiao Jing (Цзяо Цзин)	Национальный центр космических исследований КАН
9	Gao Yanni (Гао Яньни)	Национальный центр космических исследований КАН
10	Lu Li (Лу Ли)	Национальный центр космических исследований КАН
11	Cui Haiying (Цуй Хайин)	Национальный центр космических исследований КАН
12	Li Hui (Ли Хуэй)	Национальный центр космических исследований КАН
13	Chen Tao (Чэнь Тао)	Национальный центр космических исследований КАН
14	Xu Jiyao (Сюй Цзияо)	Национальный центр космических исследований КАН
15	Du Lifang (Ду Лифан)	Национальный центр космических исследований КАН
16	Zong Qiugang (Цзун Цюган)	Пекинский университет
17	Zhou Xuzhi (Чжоу Сюйчжи)	Пекинский университет
18	Pan Zonghao (Пань Цзунхао)	Научно-технический университет Китая

С 20 по 23 августа научные сотрудники Цзянькуи Ши, Чжэн Ван и Шэпин Шан из Национального центра космических исследований КАН посетили Институт для проведения совместных научно-исследовательских работ в рамках гранта РФФИ № 16-55-53003 «Особенности реакции ионосферы Восточно-Азиатского региона на геомагнитные воз-

мущения». В ходе визита участники проекта посетили Байкальскую астрофизическую обсерваторию, обсудили необходимость выполнения статистического анализа появления F-рассеяния на средних широтах по данным дигизонда, установленного в ИСЗФ, а также результаты совместных исследований ионосферы во время магнитных возмущений вблизи меридиана 120° N.

С 20 по 21 августа научный сотрудник Ван Дзянянь из Национального центра космических наук КАН посетила Институт с целью обсуждения результатов реализации совместного проекта и планов совместной работы на ближайший год. Во время визита была совершена экскурсия на оз. Байкал с посещением Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории в п. Листвянка.

С 20 по 26 августа в Институте с визитом находились научные сотрудники Лин Ганхуа и Ван Сяофан из Национальных астрономических обсерваторий КАН. Цель визита — работа по проекту РФФИ №15-52-53125 ГФЕН-а «Эволюция магнитного поля на Солнце и его спиральности в 22-летнем цикле: систематические долговременные наблюдения и теоретические модели». За время пребывания Лин Г. и Ван С. в ИСЗФ СО РАН были проведены ознакомительные экскурсии в Байкальскую астрофизическую обсерваторию и Саянскую солнечную обсерваторию. В рамках совместного проекта было проведено несколько заседаний по обсуждению работ, связанных с совместным использованием данных телескопа СТОП ССО и SMAT Солнечной обсерватории Хуайроу вблизи Пекина.

С 10 по 21 октября научный сотрудник Цэгмэд Баттуулай из Института астрономии и геофизики Монгольской академии наук посетил Институт. В ходе визита прошло обсуждение планов совместных исследований по проблеме космической погоды.

Таблица 14. Участие сотрудников ИСЗФ СО РАН
в работе Международных организаций

Название международной организации	Фамилия
Американская ассоциация содействия развитию науки (American Association for Advancement of Science — AAAS)	Головко А.А.
Американский геофизический союз (American Geophysical Union — AGU)	Мишин В.В., Потапов А.С.
Азиатско-тихоокеанское сообщество наук о Земле (Asia Oceania Geosciences Society — AOGS)	Мыльникова А.А., Ойнац А.В., Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В.
Сообщество европейских солнечных радио-астрономов (Community of European Solar Radio Astronomers — CESRA)	Алтынцев А.Т., Гречнев В.В., Кузнецов А.А., Смольков Г.Я.
Международная общественная организация «Астрономическое Общество» (Eurasian Astronomical Society – EAAS)	Б.В. Агалаков, В.В. Гречнев, В.М. Григорьев, С.А. Григорьева, Л.В. Ермакова, М.Л. Демидов, Л.К. Кашапова, Н.И. Кобанов, Г.И. Кушталь, В.П. Максимов, А.В. Мордвинов, В.В. Пипин, Л.А. Плюснина, Г.Я. Смольков, Р.А. Сыч, В.М. Томозов, В.Г. Файнштейн, Н.М. Фирстова, А.И. Хлыстова, С.А. Язев
Европейское астрономическое сообщество (European Astronomical Society – EAS)	Л.К. Кашапова

Европейский союз наук о Земле (European Geosciences Union – EGU)	Ясюкевич Ю.В.
Международный экспертный комитет по строительству Бразильского дециметрового радиотелескопа (International Advisory Committee of Brazilian Decimetric Array – BDA)	Р.А. Сыч
Международный астрономический союз (International Astronomical Union – IAU)	А.Т. Алтынцев, В.В. Гречнев, В.М. Григорьев, Демидов М.Л., Л.Л. Кичатинов, Д.Ю. Колобов, В.В. Пипин, Г.Я. Смольков, Р.А. Сыч
Международный проект «Международная справочная модель ионосферы» (International Reference Ionosphere (IRI) Project)	К.Г. Ратовский
Национальный координатор программы Международная инициатива Космическая погода (International Space Weather Initiative – ISWI)	Г.А. Жеребцов
Национальный представитель в Объединенной организации солнечных наблюдений (Joint Organization for Solar Observations – JOSO)	А.А. Головко, Г.Я. Смольков, Р.А. Сыч
Международная общественная организация «Оптическое общество им. Д.С. Рождественского» (Optical society named after D.S. Rozhdestvensky)	В.И. Скоморовский
Национальный представитель Международного научного комитета по солнечно-земной физике (Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics – SCOSTEP)	Г.А. Жеребцов
Представитель научной дисциплины в Международном комитете по солнечно-земной физике (Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics – SCOSTEP)	А.П. Потехин, Р.А. Сыч
Переменность Солнца и его воздействие на Землю (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact – VarSITI)	В.В. Гречнев, И.К. Едемский, В.И. Куркин, А.В. Медведев, И.В. Медведева, А.А. Мыльникова, А.В. Ойнац, В.В. Пипин, К.Г. Ратовский, Г.Я. Смольков, М.А. Челпанов, М.А. Черниговская, Б.Г. Шпынев, Ю.В. Ясюкевич

6.5. Издательская деятельность

В 2016 г. Институтом согласно плану выпуска были изданы:

1. Журнал «Солнечно-земная физика», Т. 2, № 1–4.
2. Электронные публикации: “Solar-Terrestrial Physics”, Vol. 2, Iss. 1–4 (переводная английская версия журнала «Солнечно-земная физика»);
3. VI Межрегиональная научная конференция школьников «Человек и космос – 2016»: Тезисы докладов.
4. Отчет о научной и научно-организационной деятельности в 2015 г.
5. Авторефераты диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук:

- Мячин Даниил Юрьевич. Структура и развитие внепятенных солнечных вспышек.

- Шиховцев Артем Юрьевич. Исследование оптической нестабильности земной атмосферы и условий коррекции солнечных изображений;
- Щербаков Александр Анатольевич. Расчет скорости нейтральных ветров на ионосферных высотах по данным Иркутского радара НР;
- Гркович Константин Владимирович. Моделирование характеристик сигнала среднеширотного когерентного эха по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния.

Выполнены дизайнерские работы по оформлению грамот, поздравительных адресов, презентаций, стендов и пр., печать, копирование, ламинирование документов.

6.6. Работа библиотеки

За 2016 г. добавлены новые записи в электронный каталог «Публикации сотрудников Института», и на сегодняшний момент в каталоге отражено 16186 публикаций. В БД «Электронные книги» прибавилось еще 97 новых книг.

За отчетный год, по запросам сотрудников, скачано 653 статьи, выполнено 33 заказа по МБА из удаленных источников (библиотеки других городов) для наших сотрудников и сотрудников других институтов, отсканировано 11 статей и 5 книг.

Продолжается работа по занесению в электронный каталог содержания вновь поступающих выпусков журналов «Геомагнетизм и аэрономия», «Астрономический журнал», «Письма в Астрономический журнал».

Оцифровано 17 выпусков журнала «Геомагнетизм и аэрономия» за 1992–1995 гг. (всего 309 статей).

Наполняемость электронной библиотеки Института на конец ноября достигла 80.4 ГБ (79621 файлов статей).

Продолжается ежеквартальное обновление Единого электронного каталога UNIT сведениями о новых поступлениях. Поступления за 2016 г. были небольшими, так как фонд пополнялся только книгами, полученными в дар от сотрудников-авторов и различных профильных организаций. За год был куплен только 1 экземпляр книги «Астрономический ежегодник» за 2017 г.

Благодаря четкой работе интернет-версии ИРБИСА, пользователи электронной библиотеки активно используют возможность просматривать электронные каталоги библиотеки ИСЗФ и Объединенного каталога библиотек ИНЦ.

Из-за недостатка финансирования по решению библиотечного совета список отечественной периодики по подписке был сокращен. Издательство «Наука», с которым был заключен договор на 2016 г., поставляло периодику с большими задержками, и до сих пор библиотека не получила выписанные журналы в полном объеме. Иностранные журналы в отчетном году получали только в электронном виде. Доступ к электронным научным информационным ресурсам зарубежных издательств Elsevier, Springer, American Physical Society, Cambridge University Press осуществлялся на основе грантов РФФИ по контрактам с консорциумом НЭИКОН, объединением «Академинторг» и ГПНТБ России. Дополнительно через консорциум НЭИКОН осуществлялся бесплатный доступ к ресурсам SPIE (International Society of Optical Engineering).

Проведены четыре тематические выставки: «К 50-летию посадки на Луну АЛС «Луна-9» к Дню космонавтики; «Наши труды» к Дню науки; «Окружающая среда — наше общее достояние» к 100-летию Баргузинского заповедника; «Книги-юбиляры 2016 года».

6.7. Работа с вузами

Институт сотрудничает с ИГУ (ФГБОУ ВПО Иркутский государственный университет), ИрГТУ (ФГБОУ ВПО Иркутский государственный технический университет), Байкальским экономическим университетом, Иркутским институтом железнодорожного транспорта, Иркутским педагогическим университетом, Иркутским филиалом Института гражданской авиации, Поволжским государственным технологическим университетом,

Московским физико-техническим институтом МГУ и др.

В рамках соглашения о научно-техническом и образовательном сотрудничестве между Институтом солнечно-земной физики СО РАН и Бурятским государственным университетом (БГУ) на физико-техническом факультете БГУ функционирует кафедра экспериментальной и космической физики (профессор кафедры — научный руководитель ИСЗФ СО РАН академик Жеребцов Г.А.).

Работают три совместные с вузами Иркутска структуры:

- Базовая кафедра радиоэлектроники и телекоммуникационных систем (ИСЗФ СО РАН и ФГБОУ ВПО Иркутский государственный технический университет, соглашение о сотрудничестве от 20 июля 2010 г., договор о сотрудничестве от 22 ноября 2011 г.);
- Совместная научно-исследовательская лаборатория «Плазменная радиофизика» (ИСЗФ СО РАН и ФГБОУ ВПО Иркутский государственный технический университет, соглашение о сотрудничестве от 20 июля 2010 г., договор о сотрудничестве от 30 ноября 2011 г.);
- Базовая кафедра ИСЗФ СО РАН — кафедра общей и космической физики ФГБОУ ВПО Иркутский государственный университет (Приказ по ФГБОУ ВПО ИГУ № 88 от 02.05.2012 г., протокол ученого совета ФГБОУ ВПО ИГУ № 10 от 27.04.2012 г.).

Активно используется инструментальная база Института. В обсерваториях Института ежегодно проходят практику студенты ИГУ, ИрГТУ, БГУ, проводится популяризаторская деятельность. В 2016 г. для школьников и населения было проведено множество экскурсий:

- Байкальская астрофизическая обсерватория (п. Листвянка) — 10;
- Саянская солнечная обсерватория (п. Монды) — 7;
- Радиоастрофизическая обсерватория (урочище Бадары) — 4.

Ученые Института совмещают свою научную деятельность с преподавательской работой в вузах (31 сотрудник).

В 2016 г. 15 студентов вузов выполнили в Институте курсовые и дипломные работы.

6.8. Работа научно-образовательного центра

Научно-образовательный центр (НОЦ) ИСЗФ СО РАН создан в 2008 г. Основной задачей НОЦ является организация педагогической работы и деятельности по популяризации науки, которая проводится сотрудниками Института с целью привлечения в Институт молодых перспективных научных кадров. Организационная структура НОЦ включает заведующего, секретаря и научных сотрудников Института, привлекаемых к работе НОЦ для ведения учебных курсов, чтения научных и научно-популярных лекций, руководства учебной и производственной практикой студентов, руководства научно-исследовательской работой школьников, проведения экскурсий.

В феврале 2016 г. в рамках празднования Дней науки в ИСЗФ силами НОЦ была проведена викторина по астрономии и физике между командами лицея № 1, лицея № 2 и школой № 80.

Большое место в работе НОЦ занимает работа со школьниками. В 2016 г. 25 научных сотрудников и специалистов занимались научно-исследовательской работой со школьниками в рамках подготовки к конференции школьников «Человек и космос».

Для школьников города в ИСЗФ проводится Иркутская астрономическая школа, преследующая такие цели, как подготовка к астрономическим олимпиадам, повышение уровня научной грамотности учащихся, развитие их интереса к естествознанию. Также с октября 2016 г. начались еженедельные занятия Школы физики, на которых с учащимися рассматриваются задачи повышенной сложности по физике.

15 апреля 2016 г. в рамках НОЦ при активной поддержке ИГУ и Министерства образования Иркутской области была проведена VI Научно-практическая конференция школьников «Человек и космос», посвященная Дню космонавтики.

Конференция школьников «Человек и космос» проводится с целью развития у школьников интереса к астрономии и исследованиям космического пространства, формирования стремления заниматься научной работой, ознакомления учащихся и педагогов с новейшими результатами исследований в данных областях науки. К организации конференции, а также к научному руководству школьниками в рамках конференции были привлечены 25 научных сотрудников Института. В конференции приняли участие 43 школьника, представляющие около 30 школ Иркутской области. С каждым годом наблюдается повышение уровня научных работ школьников. Для участников и слушателей конференции прочитана лекция «Солнце — звезда».

Неотъемлемой частью деятельности НОЦ является работа со студентами физического факультета ИГУ. Сотрудничество с кафедрой общей и космической физики и кафедрой радиофизики включает в себя чтение дополнительных спецкурсов, руководство курсовыми и дипломными работами. В 2016 г. ведущие ученые Института прочитали курсы лекций по физике Солнца, плазмы, ионосферы и магнитосферы. С целью ознакомления студентов с современными методами исследования околоземного космического пространства были проведены курсы лекций по экспериментальным методам радиофизической диагностики, радиофизическим исследованиям ионосферы, спутниковым системам связи. Были проведены демонстрации оборудования ИСЗФ, такого как высокочастотный радар SuperDARN, ионозонд вертикального зондирования Digisonde DPS-4 и др.

6.9. Работа музея ИСЗФ СО РАН

Музей ИСЗФ СО РАН образован в 2010 г. в год 50-летнего юбилея Института.

Целью создания музея является сохранение исторических архивов Института, проведение научно-просветительской и учебно-образовательной деятельности.

Создана большая экспозиция музея, включающая более 360 единиц хранения.

В 2016 г. музей продолжил работу по поиску новых экспонатов, созданию и реставрации альбомов, поиску фотоматериалов и созданию постеров о ветеранах Института, проработавших 50 и более лет. Эта работа ведется совместно с советом научной молодежи и профкомом Института.

По традиции в выставочном зале музея в День науки была открыта выставка «СибИЗМИР — это молодость наша. СибИЗМИР — это наша судьба».

В начале года с помощью Вакулина Ю.И. и Будаевой З.П. были подготовлены «Воспоминания об истории профсоюзной организации работников ИСЗФ СО РАН», которые планируется использовать в экспозиции 2017–2019 гг. «К 60-летию профсоюза ИСЗФ».

Музей принимал активное участие в конференции школьников «Человек и космос», посвященной Дню космонавтики. Школьники побывали в выставочном зале и получили на память буклеты, а в фойе на информационных стендах можно было посмотреть фоторепортаж и взять на память фотографию.

В 2016 г. музей дополнил материалами из семейных архивов альбом «Благодарная память твоя — СибИЗМИР», который посвящен 70-летию Победы в Великой Отечественной войне. Празднику Победы была посвящена выставка «Я хочу рассказать об отце».

Еще несколько выставочных мероприятий прошло в музее ИСЗФ СО РАН в 2016 г., в том числевВыставка к 80-летию Куклина Г.В., выдающегося исследователя Солнца.

В июне 2016 г. была открыта выставка, посвященная 60-летию солнечного направления в научной деятельности Института и создания службы Солнца. Музей принимал участие в заседании ученого совета, посвященного 60-летию оптических наблюдений.

26–29 сентября 2016 г. в Байкальском музее Иркутского научного центра (п. Листвянка, Иркутская область) состоялась Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы деятельности естественнонаучных музеев», в работе которой музей ИСЗФ СО РАН принимал активное участие. В сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции вошел доклад «Создание музейной экспозиции науч-

ных достижений Института солнечно-земной физики СО РАН», который был прочитан на конференции 27 сентября.

Музей получил сертификат участника семинара Московского центра музейного развития — «Музей и школа. Новый формат взаимодействия» (ведущая — главный редактор журнала «Музей» Медведева Е.Б.).

28 октября в рамках Фестиваля науки в Иркутске в музее ИСЗФ СО РАН прошли экскурсии, которые посетили более 40 школьников, студентов и жителей Иркутска.

В дни осенних школьных каникул (2 ноября) в музее прошло мероприятие «К папе, к маме на работу». ИСЗФ поддержал инициативу ФАНО, считая ее полезной для будущей профессиональной ориентации детей. В этот проект вошла экскурсия в музей ИСЗФ, чаепитие, просмотр фильма об ИСЗФ СО РАН и посещение лабораторий (рабочих мест родителей).

В ноябре 2016 г. зале Музея прошло несколько занятий по профориентации для 11-х классов школы № 80 и экскурсия с участием выпускника этой школы, крупного учёного, главного научного сотрудника Института, профессора Смолькова Г.Я.

В течение года в музее было проведено 14 экскурсий для школьников г. Иркутска, студентов ИГУ, ИрГТУ, жителей Иркутска и гостей из Японии, Новой Зеландии и Китая.

6.10. Работа Совета научной молодежи Института

Совет научной молодежи (СНМ) Института в 2016 г. принимал активное участие в научной и научно-организационной деятельности Института.

Силами СНМ регулярно в течение 2016 г. велась рассылка актуальной информации о научных российских и международных мероприятиях, а также спортивных мероприятиях, проводимых в Институте и ИНЦ. Кроме того. молодым сотрудникам рассылается информация о конкурсах на получение стипендий и грантов на научные исследования. СНМ поддерживает информационный стенд, на котором размещается актуальная информация для молодых сотрудников института, и сайт, на котором молодые сотрудники в интерактивном режиме могут получать необходимую им информацию по семинарам и практическим занятиям.

СНМ принимал участие в организации и проведении конференции школьников «Человек и космос». Координационная работа членов СНМ обеспечила активное участие молодежи ИСЗФ в работе конференции в качестве членов оргкомитета, руководителей работ школьников, членов жюри. СНМ оказывал активную информационную поддержку мероприятия, размещая информацию о нем и делая рассылку по электронной почте.

СНМ участвовал в организации и проведении Международной молодежной научно-практической конференции (Россия–Монголия), посвященной 95-летию установления дипломатических отношений между Россией и Монголией и 50-летию молодежного фестиваля советско-монгольской дружбы «Манжерок», включая координационную работу, обеспечение работы секций и регистрации участников, рецензирование тезисов конференции.

СНМ участвовал в проведении дней науки. В рамках дней науки совместно с НОЦ ИСЗФ СО РАН был подготовлен и проведен брейн-ринг для школьников. Организована игра «Дебаты» между молодыми учеными научных институтов г. Иркутска по актуальным вопросам финансирования науки и развития структуры научных институтов.

СНМ принимал активное участие в проведении мероприятий по популяризации науки, включая участие в Фестивале науки. В рамках фестиваля организованы две научно-популярные лекции и стенда.

В 2016 г. проводился традиционный конкурс поддержки мобильности (конференции, семинары, выступления с представлением диссертации) молодых ученых Института в рамках выделенного СНМ бюджета. Целью конкурса является не только помощь молодежи в представлении своих работ на иногородних конференциях, но и обучение

молодежи поиску альтернативных источников финансирования своих исследований, что очень важно с точки зрения привлечения внебюджетного финансирования. В рамках конкурса в текущем году поддержано 11 командировок молодых сотрудников Института.

СНМ организовывал семинары на английском языке и образовательные семинары по информационным технологиям. Семинары проводились силами молодых сотрудников ИСЗФ СО РАН, а также приглашенных ученых из ИСЗФ СО РАН и других научных организаций. В 2016 г. проведены следующие семинары на английском языке: “Decayless kink oscillations a promising tool for the seismology of solar corona” (Анфиногентов С.А.), “Generating ionospheric irregularities during the 2015 June 22 magnetic storm” (Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К.); образовательные семинары: «Параллельное программирование с MPI» (Ташлыков В.П.), «Об оформлении патентов РИД» (Кобанов Н.И.). Проведено 8 семинаров, посвященных обсуждению современных публикаций.

Осуществлялось поощрение лучших аспирантов по итогам годовой аттестации. СНМ ежегодно проводится конкурс премий аспирантов, основная задача которого состоит в повышения качества работы аспирантов. По согласованию с аттестационной комиссией за высокие результаты научной деятельности при обучении в аспирантуре было поощрено пять аспирантов ИСЗФ СО РАН: Глоба М.В., Кириченко К.Е., Мыльникова А.А., Непомнящих А.А., Сетов А.Г.

Осуществлялось взаимодействие с дирекцией Института по поощрению молодых сотрудников. СНМ ходатайствовал о награждении почетной грамотой ИСЗФ СО РАН к Дню космонавтики Жданова Д.А., Коробцева И.В., а также к Дню науки за высокие показатели научной деятельности — Афанасьева А.Н., Егорова Я.И., Колобова Д.Ю., Полякову А.А., Челпанова А.А., за активную образовательную и научную деятельность — Щербакова А.А., за активную образовательную деятельность — Веснина А.М.

Советом рассматривались кандидаты для выдвижения на соискание стипендий и премий среди аспирантов. В 2016 г. выдвинуты две кандидатуры на соискание стипендии Президента РФ среди аспирантов и студентов. Осуществлялась работа по представлению документов аспирантов ИСЗФ СО РАН для участия в конкурсе на соискание стипендии Губернатора Иркутской области.

Советом осуществлялся отбор кандидатов для участия в международной школе COSPAR Capacity Building Workshop. Были рекомендованы кандидатуры Мыльниковой А.А. и Челпанова М.А. Дополнительно оргкомитетом было принято решение поддержать кандидатуры Едемского И.К., Ясюкевича Ю.В.

При совместной организационной, финансовой и информационной поддержке совета научной молодежи и профсоюзного комитета Института регулярно проводились турниры по теннису, футболу и шахматам, были организованы молодежные встречи, в том числе молодежный новогодний вечер «Науку делаем вместе!».

6.11. Проведение научных мероприятий

С 30 июня по 3 июля 2016 г. в Томске прошел XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Организаторы симпозиума [http://symp.iao.ru/ru/aoo]: Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН, [http://www.iao.ru/ru]), Томск; Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН, [http://ru.iszf.irk.ru]), Иркутск. Сопредседатели симпозиума — академик Жеребцов Г.А. (ИСЗФ СО РАН), д.ф.-м.н. Матвиенко Г.Г. (ИОА СО РАН). Симпозиум проведен на базе ИОА СО РАН.

Симпозиум является традиционным ежегодным научным форумом, одним из самых представительных и регулярных тематических научных мероприятий в России. Растет интерес к симпозиуму в научных кругах стран ближнего и дальнего зарубежья, прежде всего, среди представителей исследовательских коллективов Франции, Китая, Казахстана, Кир-

гизии, Беларуси, участвующих в реализации совместных долгосрочных научно-технических проектов.

Популярность симпозиума отражает, например, ежегодный рост количества представляемых докладов и количества публикаций по материалам симпозиума в двенадцати тематических выпусках журнала «Оптика атмосферы и океана» (http://ao.iao.ru/ru, 1997 — Т. 10, № 12; 2001 — Т. 14, № 10; 2002 — Т. 15, № 12; 2003 — Т. 16, № 12; 2005 — Т. 18, № 12; 2006 — Т. 19, № 12; 2007 — Т. 20, № 12; 2008 — Т. 21, № 12; 2009 — Т. 22, № 10; 2010 — Т. 23, № 5; 2011 — Т. 24, № 12; 2014 — Т. 27, №. 2) и четырнадцати тематических сборниках Общества оптических инженеров США (Proceedings of SPIE, [http://spie.org/publications/conference-proceedings]).

Тематика симпозиума 2016 г. включала следующие направления: молекулярная спектроскопия атмосферных газов, поглощение радиации в атмосфере и океане, радиационные процессы и проблемы климата, модели и базы данных для задач оптики и физики атмосферы, распространение волн в случайно-неоднородных средах, адаптивная оптика, нелинейные эффекты при распространении волн в атмосфере и водных средах, многократное рассеяние, оптическая связь, перенос и обработка изображений, прикладные вопросы применения лазеров, оптические и микрофизические свойства атмосферного аэрозоля и взвесей в водных средах, элементный и ионный состав примесей в приземном слое атмосферы, перенос и трансформация аэрозольных и газовых компонент в атмосфере, лазерное и акустическое зондирование атмосферы и океана, диагностика состояния и функционирования растительных биосистем и биологических объектов, структура и динамика приземной и средней атмосферы, динамика атмосферы и климат Азиатского региона, физические процессы и явления в термосфере и ионосфере Земли, радиофизические и оптические методы диагностики атмосферы Земли и подстилающей поверхности, прогноз изменений климата.

В работе симпозиума приняли участие 230 ученых, в том числе 5 из Китая, 134 из Томска, 91 из других городов России. Участниками представлено 427 научных докладов высокого уровня, из них 5 пленарных, 194 устных, 211 стендовых. География присланных докладов — Россия, Беларусь, Украина, Киргизия, Казахстан, Таджикистан, Франция, Китай. Во время симпозиума проводились экскурсии по Томску и прогулка участников на теплоходе по реке Томь.

По материалам симпозиума опубликованы в электронном виде на русском языке сборник тезисов докладов [http://symp.iao.ru/ru/aoo/22/progpdf] и труды симпозиума [http://symp.iao.ru/ru/aoo/22/proceedings], ожидается выпуск сборника «Proceedings of SPIE» (Vol. 10035) в декабре 2016 г. Симпозиум позволил ученым обменяться информацией и оценить достижения участников по сравнению с мировым уровнем, выявить современные тенденции развития исследований в области физики атмосферы, оптики атмосферы и океана, помог скоординировать усилия участников российских и международных программ в проведении целенаправленных исследований.

Участники симпозиума приняли решение провести XXIII симпозиум 3–7 июля 2017 г. в Иркутске на базе ИСЗФ СО РАН.

С 3 по 9 июля 2016 г. в Томске прошла XXV Всероссийская научная конференция с международным участием «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. ИСЗФ СО РАН был соорганизатором конференции. Организаторами конференции выступили: Научный совет РАН «Распространение радиоволн», Научный совет ОФН РАН «Физика солнечно-земных связей», Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН), Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН), Московский физико-технический институт (государственный университет) (МФТИ), Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

(ТУСУР), Российский новый университет (РосНОУ). Заседания прошли в конференц-залах конгресс-центра «Рубин», ИОА СО РАН, ТУСУР, ТГУ (Томск).

Целью конференции, организованной в форме пленарных, секционных заседаний и стендовых сессий, являлось обсуждение задач распространения радиоволн, дистанционного зондирования атмосферы, ионосферы и различных сред природного происхождения с использованием радиолокационных, лазерных и акустических методов и средств. Обсуждены последние научные и научно-практические достижения в области исследования ионосферы Земли, планет и межпланетной среды. Рассмотрены проблемы математического и численного моделирования процессов распространения электромагнитных волн, нелинейных эффектов в ионосфере.

В рамках конференции проведена XII Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника.

Программа конференции включала 250 докладов, представленных на пленарных, секционных заседаниях и стендовых сессиях. География присланных докладов: Россия, Германия, Нидерланды, Израиль, Мексика, Украина, Исландия, Тайвань.

В работе конференции приняли участие 165 сотрудников научных учреждений и высших учебных заведений 32 городов России (от Паратунки до Калининграда, от Мурманска до Ростова), Беэр-Шева (Израиль), Делфта (Нидерланды). Доклады представлены учеными из Томска (59), Москвы (34), Иркутска (25), Улан-Удэ (15), Якутска (10), Ростова-на-Дону (8), Нижнего Новгорода (6), Казани (5) и Харькова (5).

С 15 по 19 августа 2016 г. в Якутске прошла Международная конференция по космической погоде (XIII Российско-Китайская конференция по космической погоде). ИСЗФ СО РАН был соорганизатором конференции.

Конференция была посвящена фундаментальной проблеме солнечно-земной физики, связанной с изучением космической погоды, влияющей на различные системы космического и наземного базирования, а также здоровье человека. Цель конференции — обмен результатами исследований между специалистами из России и Китая в разных областях солнечно-земных связей (от возмущений на Солнце до возмущений в нижней атмосфере Земли) и определение основных направлений дальнейших работ, а также решение проблем мониторинга ближнего космоса и различных геофизических параметров и выработка новых подходов к прогнозу космической погоды, влияющей на различные системы космического и наземного базирования и здоровье человека.

В конференции приняли участие 83 ученых и специалиста, среди которых 34 представителя шести научных организаций Китая (National Space Science Center of CAS, Institute of Geology and Geophysics of CAS, National Astronomical Observatories of CAS, University of Science and Technology of China, Institute of Atmospheric Physics of CAS, Peking University) и 10 иногородних участников из двух научных организаций России (ИСЗФ СО РАН, ПГИ РАН). Возраст участников: до 35 лет — 11 китайских ученых, 14 ученых и специалистов ИСЗФ.

На конференции было представлено 99 докладов (61 устный, 38 стендовых).

6.12. Участие в выставках

На постоянно действующей выставке разработок Сибирского отделения в Новосибирске демонстрируется прикладная разработка ИСЗФ СО РАН «Региональный мониторинг состояния окружающей среды с помощью дистанционного спутникового зондирования».

6.13. Участие в научных мероприятиях

В 2016 г. сотрудники Института участвовали в многочисленных научных мероприятиях как российских, так и международных, в том числе зарубежных.

Российские:

1. III Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки», Воронеж, 11–12 февраля 2016 г.

2. XXV Всероссийская открытая конференция «Распространение радиоволн», Томск, 4–9 июля 2016 г.

3. «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, 19–23 сентября 2016 г.

4. III Всероссийская конференция «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе», Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.

5. Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14–18 ноября 2016 г.

6. XXXIX семинар «Физика авроральных явлений», Апатиты, 29 февраля — 4 марта 2016 г.

7. XIX Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 5–6 мая 2016 г.

8. XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2016», Пулково, Санкт-Петербург, 10–14 октября 2016 г.

9. XX Школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», Нижний Новгород, 25–27 мая 2016 г.

Международные:

1. XI ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 15–19 февраля 2016 г.

2. The First VarSITI General Symposium, Albena, Bulgaria, 5–13 June 2016.

3. The V International Conference «Atmosphere, Ionosphere, Safety», Kaliningrad, Russia, June 19–25, 2016.

4. XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 28 июня — 10 июля 2016 г.

5. XII Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды», Томск, 5–9 июля 2016 г.

6. The First International Conference on GNSS+: Advances, Opportunities and Challenges (ICG+2016), Shanghai, China, 27–30 July 2016.

7. AOGS 13th Annual Meeting (AOGS-2016), Beijing, China, 31 July — 5 August 2016.

8. The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather, Yakutsk, Russia, 15–19 August 2016.

9. COSPAR Capacity Building Workshop “Impact of Space Weather on Earth”, Paratunka, Kamchatka, Russia, 15–26 August 2016.

10. VII Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 29 августа — 2 сентября 2016 г.

11. XI Международная школа-конференция «Проблемы геокосмоса», Санкт-Петербург, 3–7 октября 2016 г.

12. The 5th RadioSun Workshop and Summer School, České Budějovice, the Czech Republic, 23–27 May 2016.

13. The 15th RHESSI Workshop, Graz, Austria, 26–30 July 2016.

14. CESRA Workshop “Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth”, Orléans, France, 13–17 June 2016.

15. XIVth Hvar Astrophysical Colloquium “Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and in the Future”, Hvar, Croatia, 26–30 September 2016.

16. CHARM meeting 2016, Ghent, Belgium, 3–4 October 2016.

17. The International Symposium, “Solar Physics with Radio Observations”, September 9–11, 2016, Nagoya University, Japan.

18. The IBUKS2016 Workshop, KU Leuven, Leuven, Belgium, 13–17 June 2016.

19. Hinode-10 Science Meeting, Nagoya, Japan, 5–8 September 2016.

20. The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics. 10–14 October 2016, Moscow, Russia.

21. Eighth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Sunny Beach, Bulgaria, 30 May — 3 June 2016.

22. Международная молодежная научно-практическая конференция «Монголия–Россия», Улан-Батор, Монголия, 5–10 сентября 2016 г.

23. 3-я Международная школа молодых ученых стран СНГ, Алматы, Казахстан, 26 сентября — 1 октября 2016 г.

24. Solar Polarization Workshop 8 (SPW8), Firenze, Italy, 12–16 September 2016.

25. SPIE Astronomical telescopes + Instrumentation, Edinburgh, United Kingdom, 26 June — 1 July 2016.

7. Публикации

7.1. Статьи в отечественных журналах

1. Андреева О.А., Руденко Г.В., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г. Изменение суммарного магнитного потока Солнца со временем, широтой и высотой // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2016. Т. 112, № 1. С. 18–27.

2. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Больбасова Л.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Чупраков С.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 895–904.

3. Ахтемов З.С., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. Структура магнитного поля на высотах 1–1.15 радиуса Солнца // Астрон. журн. 2016. Т. 93, № 9. С. 827.

4. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В. Спектральные измерения собственного излучения ночной атмосферы с помощью спектрографа SHAMROCK SR-303i // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 192–197.

5. Белецкий А.Б., Михалев А.В., Хахинов В.В., Лебедев В.П. Оптическое проявление работы бортовых двигателей низкоорбитальных космических аппаратов // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 85–91.

6. Белоусова Е.П., Латышева И.В., Латышев С.В., Лощенко К.А., Щеблыкин А.С. Природные факторы возникновения лесных пожаров на территории Иркутской области // Биосфера. 2016. Т. 8, № 4. С. 390–400.

7. Белоусова Е.П., Латышева И.В., Латышев С.В., Лощенко К.А., Щеблыкин А.С. Природные факторы возникновения лесных пожаров на территории Иркутской области // Биосфера. 2016. Т. 8, № 4. С. 390–400.

8. Боровик А.В., Мячин Д.Ю., Уралов А.М. Модель внепятенной вспышки // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2016. Т. 112, № 1. С. 38–46.

9. Боровик А.В., Коняев П.А., Жданов А.А. Построение световых кривых солнечных вспышек в линии Hα // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5. С. 547–557.

10. Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г., Ткаченко А.Ю., Воробьев В.С., Семена А.Н., Мещеряков А.В., Додонов С.Н., Еселевич М.В., Павлинский М.Н. Выборка катаклизмических переменных, обнаруженных в рентгеновском обзоре площадью 400 кв. градусов // Письма в АЖ. 2016. Т. 42, № 4. С. 273–284.

11. Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С., Лутовинов А.А., Ревнивцев М.Г., Сазонов С.Ю., Ткаченко А.Ю., Хорунжев Г.А., Яскович А.Л., Павлинский М.Н. Наблюдательные возможности нового спектрографа среднего и низкого разрешения на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории // Письма в

АЖ. 2016. Т. 42, № 5. С. 333.

12. Воейков С.В., Бернгардт О.И., Шестаков Н.В. Использование индекса возмущенности вертикальных вариаций ПЭС при исследовании ионосферных эффектов Челябинского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 2. С. 234–243.

13. Глоба М.В., Васильев Р.В., Кушнарев Д.С., Медведев А.В. Интерферометрические наблюдения мерцаний дискретного радиоисточника Лебедь-А на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 24–31.

14. Григорьев В.М., Ермакова Л.В. Подъем вещества и динамика магнитного поля в формирующейся полутени солнечного пятна // Астрон. журн. 2016. Т. 93, № 2. С. 240–246.

15. Дегтярев В.И., Попов Г.В., Чудненко С.Э. Энергетический бюджет главных фаз магнитосферных бурь // Вопросы естествознания. 2016. № 3(11). С. 9–15.

16. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В., Кашкина Т.В., Гамаюнов И.Ф. Экспериментальные наблюдения ускорения фазы несущей в условиях полярной ионосферы // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 10. С. 946–951.

17. Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Зимовец И.В., Руденко Г.В. Исследование начальной стадии формирования «импульсного» коронального выброса массы // Астрон. журн. 2016. Т. 93, № 11. С. 990–1002.

18. Еселевич В.Г. Природа возникновения корональных выбросов массы: современное состояние исследований и последние результаты // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2016. Т. 112, № 1. С. 47–57.

19. Еселевич М.В., Хахинов В.В., Клунко Е.В. Параметры оптических сигналов на телескопе АЗТ-33ИК, зарегистрированных в активном космическом эксперименте «Радар – Прогресс» // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 24–32.

20. Жданов Д.А., Лесовой С.В., Тохчукова С.Х. Источники солнечных микроволновых всплесков III типа // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 12–21.

21. Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П. Реакция ионосферы на запуск ракеты с космодрома Восточный // ДАН. 2016. Т. 471, № 5. С. 586–589.

22. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. Влияние магнитных бурь и суббурь на свои навигационной системы GPS в высоких широтах // Космич. исслед. 2016. Т. 54, № 1. С. 23–33.

23. Золотухина Н.А., Куркин В.И., Полех Н.М., Романова Е.Б. Динамика обратного рассеяния во время большой геомагнитной бури по данным Екатеринбургского радара: 17–22 марта 2015 г. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 24–42.

24. Ишин А.Б., Тинин М.В., Безлер И.В., Конецкая Е.В. Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12/2, ч. 1: Распространение радиоволн: тематический выпуск. С. 88–92.

25. Ким А.Г., Пономарчук С.Н., Котович Г.В., Романова Е.Б. Моделирование z-образного возмущения на луче Педерсена дистанционно-частотной характеристики наклонного зондирования с использованием моделей ионосферы // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 43–53.

26. Кичатинов Л.Л. Неоднородность вращения вблизи поверхности Солнца как индикатор подфотосферных магнитных полей // Письма в АЖ. 2016. Т. 42, № 5. С. 379.

27. Кичигин Г.Н. Уединенные БМЗ-волны, распространяющиеся под углом к магнитному полю в холодной бесстолкновительной плазме // Физика плазмы. 2016. Т. 42, № 1. С. 50–57.

28. Кичигин Г.Н., Мирошниченко Л.И., Сидоров В.И., Язев С.А. Скин-слой эруптивного магнитного жгута в крупных солнечных вспышках // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 4. С. 423–430.

29. Клибанова Ю.Ю., Мишин В.В., Цэгмед Б., Моисеев А.В. Свойства дневных длиннопериодных пульсаций во время начала магнитосферной бури // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 4. С. 457–471.

30. Клименко М. В., Клименко В.В., Бессараб Ф., Захаренкова И.Е., Веснин А.М.,

Ратовский К.Г., Галкин И.А., Черняк Ю.В., Ясюкевич Ю.В., Коренькова Н.А., Котова Д.С. Суточные и долготные вариации в ионосфере Земли в период солнцестояния в условиях глубокого минимума солнечной активности // Космич. исслед. 2016. Т. 54, № 1. С. 10–22.

31. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф., Кореньков Ю.Н., Розанов Е.В., Рэддманн Т., Захаренкова И.Е., Толстиков М.В. Использование моделей средней и верхней атмосферы для описания возмущений полного электронного содержания, вызванных стратосферным потеплением 2009 г. // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 41–48.

32. Клименко В.В., Карпачев А.Т., Клименко М.В., Ратовский К.Г., Коренькова Н.А. Широтная структура долготного эффекта в ночной ионосфере в периоды летнего и зимнего солнцестояний // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 21–30.

33. Клунко Е.В., Еселевич М.В., Тергоев В.И. Наблюдения ТГК «Прогресс» на оптическом телескопе АЗТ-33ИК // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 17–23.

34. Кобанов Н.И., Чупин С.А., Колобов Д.Ю. Периодические вариации профилей BaII 4554 Å и CaII 8542 Å в корональных дырах // Письма в АЖ. 2016. Т. 42, № 1. С. 60–67.

35. Кобелев П.Г., Абунин А.А., Абунина М.А., Преображенский М.С., Смирнов Д.В., Луковникова А.А. Барометрический эффект нейтронной компоненты космических лучей на антарктической станции Мирный с учетом ветра // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 71–75.

36. Ковадло П.Г., Лубков А.А., Бевзов А.Н., Будников К.И., Власов С.В., Зотов А.А., Колобов Д.Ю., Курочкин А.В., Котов В.Н., Лылов С.А., Лях Т.В., Максимов А.С., Перебейнос В.А., Петухов А.Д., Пещеров В.С., Попов Ю.А., Русских И.В., Томин В.Е. Система автоматизации Большого солнечного вакуумного телескопа // Автометрия. 2016. Т. 52, № 2. С. 97–106.

37. Козырева О.В., Пилипенко В.А., Энгебретсон М., Климушкин Д.Ю., Магер П.Н. Соответствие между пространственным распределением мощности УНЧ-волн и границами аврорального овала // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 35–45.

38. Корсунова Л.П., Чистякова Л.В., Хегай В.В. Изменения в ионосфере перед слабыми землетрясениями в регионе Иркутска // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 4. С. 525–534.

39. Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Космические лучи во время гигантских геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 2. С. 154–162.

40. Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Наземное возрастание интенсивности космических лучей 6 ноября 1997 г.: спектры и анизотропия // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, № 1–2. С. 9–15.

41. Крюковский А.С., Куркин В.И., Ларюнин О.А., Лукин Д.С., Подлесный А.В., Растягаев Д., Черняк Я.М. Численное моделирование амплитудных карт для скорректированной модели IRI-2012 с плавными возмущениями ионосферы // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 8. С. 794–799.

42. Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Долговременные изменения в нейтральном газовом составе термосферы над Норильском (2003–2013 гг.) // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 92–97.

43. Латышев С.В., Олемской С.В. Связь северо-южной асимметрии пятнообразования с амплитудой 11-летних циклов солнечной активности // Письма в АЖ. 2016. Т. 42, № 7. С. 540.

44. Ларюнин О.А. Эффекты распространения радиосигнала в нестационарной ионосфере на основе численного решения одномерного волнового уравнения // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5. С. 645–651.

45. Ларюнин О.А. Численный синтез ионограмм в горизонтально-неоднородной ионосфере на основе модели комбинированного параболического слоя // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 52–58.

46. Ларюнин О.А. О погрешностях изотропного приближения при геометрооптическом описании распространения радиоволн в ионосфере // Вестник Сибирского государ-

ственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. 2016. Т. 17, № 2. С. 318–323.

47. Ларюнин О.А. Отображение признаков перемещающихся ионосферных возмущений на ионограммах вертикального зондирования // Изв. вузов. Физика. Распространение радиоволн: тематический выпуск. 2016. Т. 59, № 12/2, ч. 1. С. 93–96.

48. Лившиц М.А., Григорьева И.Ю., Мышьяков И.И., Руденко Г.В. Наблюдательные свидетельства связи всплытия магнитных полей, токов и солнечных вспышек 10 мая 2012 г. // Астрон. журн. 2016. Т. 93, № 10. С. 907.

49. Липко Ю.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А., Хахинов В.В. Эффекты в магнитном поле Земли от работы двигателей космического корабля // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 33–40.

50. Лубышев Б.И., Обухов А.Г. Двухмерная теорема Котельникова с учетом направления сканирования // Вестник ИрГТУ. 2016. № 1. С. 48–55.

51. Малащук В.М., Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В. Магнитоизолированные комплексы в 24 цикле солнечной активности // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2016. Т. 112, № 1. С. 58–66.

52. Машнич Г.П., Башкирцев В.С. Движения и колебания в волокне перед эрупцией // Астрон. журн. 2016. Т. 93, № 2. С. 247–253.

53. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Об особенностях изменений энергетических спектров ионов во вспышечных потоках солнечных космических лучей // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2016. Т. 112, № 1. С. 71–77.

54. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Изменение соотношения Fe/O в период возмущенной стадии развития потоков СКЛ. Проявления FIP-эффекта в составе СКЛ // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 2. С. 217–227.

55. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Вариации отношения Fe/O при изменении энергии ионов в потоках ускоренных солнечных частиц // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 6. С. 690–699.

56. Михайлов С.Я., Грозов В.П., Чистякова Л.В. Реконструкция динамики ионосферных возмущений по данным квазивертикального и вертикального зондирования ионосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, N 5. С. 377–388.

57. Михалев А.В., Хахинов В.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П. Оптический эффект работы бортового двигателя космического аппарата «Прогресс-17М» на высотах термосферы // Космич. исслед. 2016. Т. 54, № 2. С. 113–118.

58. Михалев А.В., Подлесный С.В., Стоева П. Свечение ночной атмосферы в RGB цветовом представлении // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С.74–80.

59. Михалев А.В. Излучение верхней атмосферы Земли в эмиссии [OI] 557.7 нм в периоды сейсмических событий в Байкальской рифтовой зоне // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1068–1072.

60. Мишин В.М., Мишин В.В., Моисеев А.В. Распределение продольных токов в ионосфере: асимметрия утро – вечер и ее связь с асимметрией в двух полушариях // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5. С. 558–567.

61. Мордвинов А.В., Певцов А.А., Бертелло Л., Петри Г.Дж.Д. Инверсия магнитного поля Солнца в 24-м цикле // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 3–13.

62. Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В. Тестирование методики определения абсолютного полного электронного содержания и градиентов ПЭС // Изв. вузов. Физика. Распространение радиоволн: тематический выпуск. 2016. Т. 59, № 12/2, ч. 1. С. 74–77.

63. Ойнац А.В., Васильев Р.В. Способ автоматической идентификации сигналов, приходящих с заднего сектора обзора когерентного КВ-радара // Изв. вузов. Физика. Распространение радиоволн: тематический выпуск. 2016. Т. 59, № 12/2, ч. 1. С. 121–124.

64. Пензин М.С., Ильин Н.В. Моделирование доплеровского сдвига частоты в многолучевых радиоканалах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 57–63.

65. Пензин М.С., Ильин Н.В. Тонкая структура доплеровского сдвига частоты при зондировании ионосферы // Изв. вузов. Физика. Распространение радиоволн: тематиче-

ский выпуск. 2016. Т. 59, № 12/3, ч. 2. С. 7–10.

66. Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Воейков С.В., Быков В.Г., Герасименко М.Д., Park P.H. Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku, в дальней от очага зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1. С. 186–196.

67. Перевалова Н.П., Едемский И.К., Тимофеева О.В., Каташевцева Д.Д., Полякова А.С. Динамика возмущенности полного электронного содержания в высоких и средних широтах по данным GPS // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 36–43.

68. Пещеров В.С., Власов С.В., Лылов С.А. Определение координат центра изображения Солнца в солнечных телескопах оперативных прогнозов // Вестник Новосибирского гос. университета. Серия: Информационные технологии. 2016. Т. 14, № 3. С. 61–68.

69. Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Подлесный А.В. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5. С. 591–605.

70. Полякова А.С. Вариации электронной концентрации ионосферы в периоды внезапных стратосферных потеплений в Арктическом регионе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 6. С. 175–184.

71. Поляченко Е.В., Шухман И.Г. Об одной классической задаче в теории неустойчивости радиальных орбит // Письма в АЖ. 2016. Т. 42, № 2. С. 120–135.

72. Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Ляхов А.Н., Пензин М.С., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ-радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы метода нормальных волн // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12/2, ч. 1: Распространение радиоволн: тематический выпуск. С. 70–73.

73. Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Ойнац А.В., Пашинин А.Ю., Райта Т., Цэгмед Б. Первый опыт оценки ионного состава над ионосферой по данным о частотной структуре излучения ИАР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 192–202.

74. Потапов А.С., Рыжакова Л.В., Цэгмед Б. Метод прогнозирования потока релятивистских электронов на геостационарной орбите // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. 2016. Т. 17, № 3. С. 611–617.

75. Потапов А.С., Довбня Б.В., Баишев Д.Г., Полюшкина Т.Н., Рахматулин Р.А. Узкополосное излучение с изменяющейся от 0.5 до 3.5 Гц частотой на фоне главной магнитной бури 17 марта 2013 г. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 13–23.

76. Потехин А.П., Сетов А.Г., Лебедев В.П., Медведев А.В., Кушнарев Д.С. Перспективный радар НР–МСТ: потенциал и диагностические возможности // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 3–16.

77. Рахматулин Р.А., Липко Ю.В., Пашинин А.Ю., Алешков В.М. Исследование пространственно-временной структуры неоднородностей геомагнитного поля Байкальской рифтовой зоны // Актуальные проблемы науки Прибайкалья: сборник статей. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. С. 194–200.

78. Рахматулин Р.А., Липко Ю.В., Пашинин А.Ю., Алешков В.М. Мониторинг геомагнитного поля в зоне Байкало-Хубсугульского разлома в 2009–2015 гг. // Вопросы естествознания. 2016. № 3(11). С. 115–116.

79. Руденко Г.В., Дмитриенко И.С. Проникновение внутренних гравитационных волноводных мод в верхнюю атмосферу // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 44–55.

80. Семенов А.И., Шефов Н.Н., Медведева И.В., Хомич В.Ю., Железнов Ю.А. Эмпирическая модель вариаций эмиссий континуума верхней атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1. С. 171–185.

81. Семенов А.И., Медведева И.В., Перминов В.И., Хомич В.Ю. Пространственно-временные вариации инфракрасных эмиссий верхней атмосферы. 1. Излучение (λ 63 мкм) атомарного кислорода // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 5. С. 652–656.

82. Скоморовский В.И., Кушталь Г.И., Лоптева Л.С., Прошин В.А., Трифонов В.Д.,

Чупраков С.А., Химич В.А. Хромосферный телескоп Байкальской астрофизической обсерватории. Новый свет // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 69–85.

83. Смольков Г.Я., Баркин Ю.В. Солнечно-земные связи: новое в изучении и объяснении // Земля и Вселенная. 2016. № 3. С. 87–99.

84. Смольков Г.Я. Сибирский солнечный радиотелескоп // Антенны. 2016. № 8. С. 77–83.

85. Сорокин, А.Г. Инфразвуковое излучение Челябинского метеороида // Изв. РАН. Сер. физическая. 2016. Т. 80, № 1. С. 101–105.

86. Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода для умеренно-возмущенных геомагнитных условий на средних широтах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 76–84.

87. Цап Ю.Т., Степанов А.В., Кашапова Л.К., Мягкова И.Н., Богомолов А.В., Копылова Ю.Г., Гольдварг Т.Б. Временные задержки нетеплового излучения солнечных вспышек по наблюдениям на КОРОНАС-Ф // Космич. исслед. 2016. Т. 54, № 4. С. 302–307.

88. Челпанов М.А., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Бернгардт О.И., Магер О.В. Наблюдения дрейфово-компрессионных волн с помощью среднеширотного декаметрового когерентного радара // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 46–56.

89. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Медведева И.В. Квазипериодические вариации в атмосферах Солнца, звезд и планет // ДАН. 2016. Т. 468, № 1. С. 93–96.

90. Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Хабитуев Д.С. Спектральные характеристики атмосферных волн, генерируемых зимним стратосферным струйным течением Северного полушария // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 120–131.

91. Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Мелич Й. Пространственные вариации параметров ионосферы Северного полушария над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 204–215.

92. Язев С.А., Мордвинов А.В., Дворкина-Самарская А.А. Корона во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. и развитие 24-го цикла // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 3–11.

7.2. Статьи в иностранных журналах, включая переводные

1. Abunin A.A., Kobelev P., Abunina M.A., Preobrajenskiy M., Smirnov D., Lukovnikova A.A. A wind effect of neutron component of cosmic rays at Antarctic station Mirny // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2, N 1. P. 97–103. http://naukaru.ru/journal/issue/683/. DOI: 10.12737/19882.

2. Afanasyev A., Uralov A.M. Slow-mode MHD wave penetration into a coronal null point due to the mode transmission // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3185–3193.

3. Akhtemov Z.S., Stepanyan N.N., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Structure and magnetic field at altitudes of 1–1.15 solar radii // Astronomy Rep. 2016. V. 60, N 9. P. 839–847.

4. Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Meszarosova H., Karlicky M., Palshin V., Lesovoi S.V. Sources of quasi-periodic pulses in the flare of 18 August 2012 // Solar Phys. 2016. V. 291, N 2. P. 445–463.

5. Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Motion magnification in coronal seismology // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3251–3267.

6. Antokhina O., Antokhin P.N., Martynova Y.V., Mordvinov V.I. The impact of atmospheric blocking on spatial distributions of summertime precipitation over Eurasia // IOP Conference Series - Earth and Environmental Science. 2016. V. 48: Intern. Conf. and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modelling and Information System (ENVIROMIS-2016), Tomsk, Russia, July 11–16, 2016. Art. # UNSP012035.

7. Beletsky A.V., Mikhalev A.V., Khakhinov V.V., Lebedev V.P. Optical effects produced by running onboard engines of low-Earth-orbit spacecraft // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2, N 4, P. 85–91.

8. Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN Scalar radar equations // Radio Sci. 2016. V. 51, N 10. P. 1703–1724.

9. Borovik A.V., Konyaev P.A., Zhdanov D.A. Construction of the light curves for solar flares in the Hα line // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 5. P. 513–523.

10. Burenin R.A., Revtivtsev M.G., Tkachenko A., Vorob'ev V., Semena A.N., Meshcheryakov A., Dodonov S., Eselevich M.V., Pavlinsky M.N. Sample of cataclynic variables detected in the 400d X-ray survey // Astron. Lett. 2016. V. 42, N 4. P. 240–250.

11. Burenin R.A., Amvrosov A.L., Eselevich M.V., Grigoryev V.M., Aref'ev V.A., Vorob'ev V., Lutovinov A.A., Revtivtsev M.G., Sazonov S.Yu., Tkachenko A., Khorunzhev G.A., Yaskovich A.L., Pavlinsky M.N. Observational capabilities of the new medium and low resolution spectrograph at the 1.6 m telescope of the Sayan Observatory // Astron. Lett. 2016. V. 42, N 5. P. 295–306.

12. Baru N.A., Koloskov A.V., Yampolsky Y.M., Rakhmatulin R.A. Observations and analysis of ionospheric Alfven resonance mode structure in a complete 11-year solar cycle // Sun and Geosphere. 2016. V. 11, N 1. P. 49–54.

13. Baru N.A., Koloskov A.V., Yampolsky Y.M., Rakhmatulin R.A. Multipoint observations of ionospheric Alfven resonance // Adv. Astron. and Space Phys. 2016. V. 6, N 1. P. 45–49.

14. Chelpanov M., Mager P., Klimushkin D., Berngardt O.I., Mager O.V. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study // J. Geophys. Res. 2016. V. 121, N 2. P. 1315–1326.

15. Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. Influence of the magnetic field on oscillation spectra in solar faculae // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3329–3338.

16. Cheremnykh O.K., Klimushkin D., Mager P. On the structure of azimuthally small-scale ULF oscillations of a hot space plasma in a curved magnetic field: Modes with discrete spectra // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2016. V. 32, N 3. P. 120–128.

17. Chernov G.P., Sych R.A., Tan B., Yan Y.H., Tan C.-M., Fu Q., Karlicky M., Fomichev V.V. Flare evolution and polarization changes in fine structures of solar radio emission in the 2013 April 11 event // Res. in Astron. and Astrophys. 2016. V. 16, N 2. P. 008.

18. Chmielewski P., Murawski K., Sych R.A. Spatial variation of wave periods of magnetoacoustic gravity waves in the flux tube // Acta Physica Polonica B. 2016. V. 47, N 10. P. 2273–2295.

19. Churilov S.M. Stability of shear flows with multilayered density stratification and monotonic velocity profiles having no inflection points // Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics. 2016. V. 110, N 1. P. 78–108.

20. De Pasquale M., Oates S.R., Klunko E., et al. The central engine of GBR 130831 Å and the energy breakdown of a relativistic explosion // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2016. V. 455, N 1. P. 1027–1042.

21. Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V., Kashkina T.V., Gamayunov I.F. Experimental observations of carrier phase acceleration in conditions of polar ionosphere // J. Communications Technology and Electronics. 2016. V. 61, N 10. P. 1086–1090.

22. Dmitrienko I.S., Rudenko G.V. Oscillations of vertically stratified dissipative atmosphere. I. Solution above source // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2016. V. 141. P. 120–136.

23. Eselevich V. G., Eselevich M. V., Zimovets I.V. Possible reasons for the frequency splitting of the harmonics of type II solar radio bursts // Astron. Rep. 2016. V. 60, N 1. P. 163–173.

24. Eselevich V.G., Eselevich M.V., Zimovets I.V.,Rudenko G.V. Initial formation of an “impulsive” coronal mass ejection // Astron. Rep. 2016. V. 60, N 11. P. 1016–1027.

25. Eselevich M.V., Khakhinov V.V., Klunko E. Parameters of optical signals registered with the AZT-33IK telescope in active Radar–Progress space experiment // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 3. P. 32–43. http://naukaru.ru/journal/issue/811. DOI: 10.12737/22283.

26. Fainshtein V.G., Egorov Ya.I., Rudenko G.V., Anfinogentov S. Magnetic field variations accompanying the filament eruption and the flare related to coronal mass ejections // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 8. P. 1060–1067.

27. Fleishman G.D., Pal'shin V., Meshalkina N.S., Lysenko A., Kashapova L.K., Altyntsev A.T. A cold flare with delayed heating // Astrophys. J. 2016. V. 822, N 2. P. 70.

28. Golubeva E.M. Variations in ratio and correlation of solar magnetic fields in the FeI 525.02 nm and NaI 589.59 nm lines according to Mount Wilson measurements during 2000–2012 // Solar Phys. 2016. V. 291, N 8. P. 2213–2241.

29. Golubeva E.M., Mordvinov A.V. Decay of activity complexes, formation of unipolar magnetic regions, and coronal holes in their causal relation // Solar Phys. 2016. V. 291, N 12. P. 3605–3617.

30. Gorbovskoy E.S., Lipunov V.M., Buckley D., Kornilov V.G., Yazev S.A., et al. Early polarization observations of the optical emission of gamma ray bursts: GBR 150301B and GBR 150413A // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2016. V. 455, N 3. P. 3312–3318.

31. Grechnev V.V., Uralov A.M., Kochanov A.A., Kuzmenko I.V., Prosovetsky D.V., Egorov Ya.I., Fainshtein V.G., Kashapova L.K. A tiny eruptive filaments as a flux-rope progenitor and driver of a large-scale CME and wave // Solar Phys. 2016. V. 291, N 4. P. 1173–1208.

32. Grechnev V.V., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar event responsible for GLE63. I. Observations of a major long-duration flare with the Siberian Solar Radio Telescope // Solar Phys. 2016. V. 291, N 12. P. 3705-3723.

33. Grigoryev V.M., Ermakova L.V. Mass upflows and magnetic - field dynamics in a forming sunspot penumbra // Astronomy Reports. 2016. V. 60, N 2. P.280-286.

34. Grigoryeva S.A., Turova I.P., Ozhogina O.A. Studying Ca II K line profile shapes and dynamic processes in the solar chromosphere at the base of a coronal hole // Solar Phys. 2016. V. 291, N 7. P. 1977–2002.

35. James M., Yeoman T.K., Mager P., Klimushkin D. Multiradar observations of substorm-driven ULF waves // J. Geophys. Res. 2016. V. 121, N 6. P. 5213–5232.

36. Kichigin G.N. Solitary fast magnetosonic waves propagating obliquely to the magnetic field in cold collisionless plasma // Plasma Phys. Rep. 2016. V. 42, N 1. P. 45–51.

37. Kichigin G.N., Miroshnichenko L.I., Sidorov V.I., Yazev S.A. Skin-layer of the eruptive magnetic flux rope in large solar flares // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 4. P. 393–400.

38. Kitchatinov L.L., Olemskoy S.V. Dynamo model for grand maxima of solar activity: Can superflares occur on the Sun? // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2016. V. 459, N 4. P. 4353–4359.

39. Kitchatinov L.L. Rotational shear near the solar surface as a probe for subphotospheric magnetic fields // Astron. Lett. 2016. V. 42, N 5. P. 339–345.

40. Kitchatinov L.L., Nepomnyashchikh A.A. Diamagnetic pumping in a rotating convection zone // Adv. Space Res. 2016. V. 58, N 8. P. 1554–1559.

41. Kitchatinov L.L. Meridional circulation in the Sun and stars // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 8. P. 945–951.

42. Kiehlmann S., Savolainen T., Sokolovsky K.V., Korobtsev I.V., et al. Polarization angle swings in blazars: The case of 3C 279 // Astron. Astrophys. 2016. V. 590. N A10.

43. Kiehlmann S., Savolainen T., Sokolovsky K.V., Korobtsev I.V., et al. Polarization angle swings in blazars: The case of 3C 279 (Corrigendum) // Astron. Astrophys. 2016. V. 592. C1.

44. Klibanova Y., Mishin V.V., Tsegmed B., Moiseev A.V. Properties of daytime long-period pulsations during magnetospheric storm commencement // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 4. P. 426–440.

45. Kim A.G., Ponomarchuk S.N., Kotovich G.V., Romanova E.B. Modeling of z- shaped disturbance at the Pedersen ray of oblique sounding ionogram using adaptation of IRI to experimental data // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2, N 4, P. 43–53.

46. Klimenko M., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Ratovsky K.G., Galkin I.A., Chernyak I.V., Yasyukevich Yu.V., Korenkova N.A., Kotova D. Diurnal and longitudinal variations in the Earth's ionosphere in the period of solstice in conditions of a deep minimum of solar activity // Cosmic Res. 2016. V. 54, N 1. P. 8–19.

47. Klimenko V.V., Karpachev A.T., Klimenko M., Ratovsky K.G., Korenkova N.A. Latitudinal structure of the longitudinal effect in the nighttime ionosphere during the summer and winter solstice // Russ. J. Physical Chemistry B. 2016. V. 10, N 1. P. 91–99.

48. Klimenko M., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Y.N., Rozanov E.V., Reddmann T., Zakharenkova I.E., Tolstikov M.V. Application of the models of the middle and upper atmosphere to simulation of total electron content perturbations caused by the 2009 stratospheric warming // Russ. J. Physical Chemistry B. 2016. V. 10, N 1. P. 109–116.

49. Klunko E., Eselevich M.V., Tergoev V.I. Progress cargo spacecraft observed with the AZT-33IK optical telescope // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 3. P. 22–31. http://naukaru.ru/journal/issue/811. DOI: 10.12737/22282.

50. Knizhin S. Improving the resolution of diagnostics of inhomogeneous plasma media in conditions of strong phase variations // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2016. V. 64, N 10. P. 697–700. http://ieeexplore.ieee.org/document/7601258.

51. Kobanov N.I., Chupin S.A., Kolobov D.Y. Periodic variations of the BaII 4554 and CaII 8542 Å line profile in coronal holes // Astron. Lett. 2016. V. 42, N 1. P. 55.

52. Kolobov D.Y., Chelpanov A.A., Kobanov N.I. Peculiarity of the oscillation stratification in sunspot penumbrae // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3339–3347.

53. Kolotkov D., Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Empirical mode decomposition analysis of random processes in the solar atmosphere // Astron. Astrophys. 2016. V. 592. P. A153.

54. Konyaev P.A., Borovik A.V., Zhdanov A. Analysis of structure and development of spotless flares using digital images of the solar chromosphere // Atmos. Oceanic Optics. 2016. V. 29, N 1. P. 89–94.

55. Kovadlo P.G., Lubkov A.A., Bevzov A.N., Budnikov K.L., Vlasov S.I., Zotov A.A., Kolobov D.Y., Kurochkin A.V., Kotov V.N., Lylov S.A., Lyakh T.V., Maksimov A.S., Perebeinos V.A., Petukhov A.D., Peshcherov V.S., Popov Y.A., Russkikh I.V., Tomin V.E. Automation system for the Large Solar Vacuum Telescope // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. V. 52, N 2. P. 187–195.

56. Korsunova L.P., Chistyakova L.V., Khegai V.V. Changes in the ionosphere prior to weak earthquakes in the Irkutsk region // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 4. P. 493–502.

57. Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Engebretson M., Klimushkin D., Mager P. Correspondence between the ULF wave power spatial distribution and auroral oval boundaries // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 2. P. 46–65. http://naukaru.ru/journal/issue/744. DOI: 10.12737/ 20999.

58. Kravtsova M., Sdobnov V.E. Ground level enhancement of cosmic rays on November 6, 1997: Spectra and anysotropy // JETP Lett. 2016. V. 103, N 1. P. 8–14.

59. Kravtsova M., Sdobnov V.E. Cosmic rays during great geomagnetic storms in cycle 23 of solar activity // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 2. P. 143–150.

60. Kryukovskii A.S., Kurkin V.I., Laryunin O.A., Lukin D.S., Podlesny A.V., Rastyagaev D.V., Chernyak Ya.M. Numerical modeling of amplitude maps for the corrected IRI – 2012 Model with smooth ionospheric disturbances // J. Communications Technology and Electronics. 2016. V. 61, N 8. P. 920.

61. Kulizhsky A.V. Uniform integral representation for the fluctuating field propagating through the multi-scale // Waves in Random and Complex Media. 2016. V. 26. P. 1–19. http://dx.doi.org/10.1080/17455030.2016.1229874.

62. Kunitsyn V., Padokhin A., Kurbatov G., Yasyukevich Yu.V., Morozov Y.V. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites // GPS Solutions. 2016. V. 20, N 4. P. 877–884.

63. Kupriyanova E.G., Kashapova L.K., Reid H.A.S., Myagkova I.N. Relationship of type III radio bursts with quasi-periodic pulsations in a solar flare // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3427–3438.

64. Kushnarenko G.P., Yakovleva O.E., Kuznetsova G.M. Long-term variations in the neutral gas composition of the thermosphere over Norilsk (2003–2013) // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2, N 4. P. 92–97.

65. Kuznetsov A.A., Keppens R., Xia C.M Synthetic radio views of simulated solar flux ropes // Solar Phys. 2016. V. 291, N 3. P. 823–845.

66. Laryunin O. A. Radio signal propagation effects in a nonstationary ionosphere based on the numerical solution of the one-dimensional wave equation // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 5. P. 610–615.

67. Laryunin O.A. Numerical synthesis of ionograms in horizontally inhomogeneous ionosphere on the basis of compound parabolic layer model // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 3. P. 74–86. http://naukaru.ru/journal/issue/811. DOI: 10.12737/22286.

68. Latyshev S.V., Olemskoy S.V. Relationship between the north-south asymmetry of sunspot formation and the amplitude of 11-year solar activity cycles // Astron. Lett. 2016. V. 42, N 7. P. 488–494.

69. Li C., Miroshnichenko L.I., Sdobnov V.E. Small ground-level enhancement of 6 January 2014: Acceleration by CME-driven shock? // Solar Phys. 2016. V. 291, N 3. P. 975–987.

70. Lipunov V.M., Gorbovskoy E.S., Kornilov V.G., Yazev S.A., et. al. MASTER optical polarization variability detection in the micro quasar V404 CYG/GS 2023+33 // Astrophys. J. 2016. V. 833, № 2. P. 198.

71. Lipunov V.M., Gorosabel J., Yazev S. A., et al. The optical identification of events with poorly defined locations: the case of the Fermi GRB 140801 A // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2016. V. 455, N 1. P. 712–724.

72. Livshits M.A., Grigoryeva I.Y., Myshyakov I.I., Rudenko G.V. Evidence for a relationship between emerging magnetic fields, electric currents, and solar flares observed on May 10, 2012 // Astronomy Rep. 2016. V. 60, N 10. P. 939–948.

73. Mashnich G.P., Bashkirtsev V.S. Motions and oscillations in a filament preceding its eruption // Astron. Rep. 2016. V. 60, N 2. P. 287–293.

74. Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Globa M.V., Vasilyev R.V. Interferometric observation of Cygnus-A discrete radiosource scintillations at Irkutsk Incoherent Scatter Radar // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 1. P. 34–43. http://naukaru.ru/journal/issue/683. DOI: 10.12737/19876.

75. Meszarosova H., Rybak J., Kashapova L.K., Gomory P., Tokhchukova S.K., Myshyakov I.I. Broadband microwave subsecond pulsations in an expanding coronal loop of the 2011 August 10 flare // Astron. Astrophys. 2016. V. 593. P. A80.

76. Mikhailov S.Y., Grozov V.P., Chistyakova L.V. Retrieval of the ionospheric disturbance dynamics based on quasi-vertical and vertical ionospheric sounding // Radiophysics and Quantum Electronics. 2016. V. 59, N 5. P. 341–351.

77. Mikhalev A.V., Khakhinov V.V., Beletsky A.B., Lebedev V.P. Optical effects of the operation of the onboard engine of the Progress M-17M spacecraft at thermospheric heights // Cosmic Res. 2016. V. 54, N 2. P. 105–110.

78. Mikhalev A.V., Podlesny S., Stoeva P. Night airglow in RGB mode // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 3. P. 106–114. http://naukaru.ru/journal/issue/811. DOI: 10.12737/22289.

79. Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Fe/O ratio variations during the disturbed stage in the development of the solar cosmic ray fluxes: Manifestations of the first ionization potential effect in the solar cosmic ray composition // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 2. P. 203–212.

80. Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Variations in the Fe/O value resulting from changes in the ion energy in flows of accelerated solar particles // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 6. P. 652–660.

81. Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Yu.A., Han J.P., Wang C. Saturation of superstorms and finite compressibility of the magnetosphere: Results of the magnetogram inversion technique and global PPMLR-MHD model // Geophys. Res. Let. 2016. V. 43, N 13. P. 6734–6741.

82. Mishin V.M., Mishin V.V., Moiseev A.V. Distribution of the field-aligned currents in the ionosphere: dawn-disk asymmetry and its relation to the asymmetry between the two hemispheres // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 5. P. 524–534.

83. Mishin V.V., Tomozov V.M. Kelvin–Helmholtz instability in the solar atmosphere, solar wind and geomagnetosphere // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3165–3184.

84. Mordvinov A.V., Pevtsov A., Bertello L., Petri G. The reversal of the Sun's magnetic field in cycle 24 // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 1. P. 3–13. http://naukaru.ru/journal/issue/683. DOI: 10.12737/19856.

85. Myagkova I.N., Bogomolov A.V., Kashapova L.K., Bogomolov V.V., Svetilov S.I., Panasyuk M.I., Kuznetsova E.A., Rozhkov G.V. Solar X-ray emission measured by the Vernov Mission during September–October of 2014 // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3439–3450.

86. Nakariakov V.M., Pilipenko V.A., Heilig B., Jelinek P., Karlicky M., Klimushkin D., Kolotkov D., Lee D.-H., Nistico G., Van Doorsselaere T., Verth G., Zimovets I.V. Magnetohydrodynamic oscillations in the solar corona and Earth's magnetosphere: Towards consolidated understanding (Review) // Space Sci. Rev. 2016. V. 200, N 1/4. P. 75–203.

87. Nakariakov V.M., Anfinogentov S., Nistico G., Lee D.-H. Undamped transverse oscillations of coronal loops as a self-oscillatory process // Astron. Astrophys. 2016. V. 591. P. L5.

88. Nakariakov V.M., Pascoe D.J., Sych R.A., van Driel-Gesztelyi L. Preface to topical issue: Waves in the solar corona: From microphysics to macrophysics // Solar Phys. 2016. V. 291, N 11. P. 3139–3142.

89. Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Berngardt O.I., Ratovsky K.G. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF Radar data // Earth, Planets, Space. 2016. V. 68, N 1. Art. ID 8.

90. Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Ratovsky K.G. Diurnal and seasonal behaviour of the Hokkaido East SuperDARN ground backscatter: Simulation and observations // Earth, Planets, Space. 2016. V. 68, N 1. Art. ID 18.

91. Pascoe D. J., Goddard C.R., Nistico G., Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Damping profile of standing kink oscillations observed by SD/AIA // Astron. Astrophys. 2016. V. 585. # A6.

92. Pascoe D. J., Goddard C.R., Nistico G., Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Coronal loop seismology using damping of standing kink oscillations by mode coupling // Astron. Astrophys. 2016. V. 589. Art. # A136.

93. Pashinin A.Yu., Khakhinov V.V., Rakhmatulin R. A., Lipko Yu.V. Geomagnetic effects caused by rocket exhaust jets // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 3. P. 43–55. http://naukaru.ru/journal/issue/811/; DOI:10.12737/22284.

94. Penzin M.S., Ilyin N.V. Modeling of Doppler frequency shift in multipath radio channels // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 2. P. 66–76. http://naukaru.ru/journal/issue/744/; DOI: 10.12737/21000.

95. Pevtsov A., Nagovitsyn Yu.A., Tlatov A.G., Demidov M.L. Solar physics research in the Russian subcontinent – current status and future // Asian J. Phys. 2016. V. 25, N 3. P. 447–460.

96. Pilipenko V.A., Klimushkin D., Mager P., Engebretson M., Kozyreva O.V. Generation of resonant Alfven waves in the auroral oval // Annales Geophysicae. 2016. V. 34, N 2. P. 241–248.

97. Pipin V.V. Magnetic helicity in non-axisymmetric mean field dynamo // Magnetohydrodynamics. 2016. V. 52, N 1/2. P. 145–154.

98. Pipin V.V., Kosovichev A.G. Dependence of stellar magnetic activity cycles on rotational period in a nonlinear solar-type dynamo // Astrophys. J. 2016. V. 823, N 2. P. 133.

99. Pipin V.V., Kosovichev A.G. Angular momentum fluxes caused by Λ-effect and meridional circulation structure of the Sun // Adv. Space Res. 2016. V. 58, N 8. P. 1490–1496.

100.Polekh N.M., Zolotukhina N.A., Romanova E.B., Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Podlesny A.V. Ionospheric effects of magnetospheric and thermospheric disturbances on March 17–19, 2015 // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 5. P. 557–571.

101.Polyachenko E.V., Shukhman I.G. On one classical problem in the radial orbit instability theory // Astron. Lett. 2016. V. 46, N 2. P. 100–114.

102.Polyakova A.S., Perevalova N.P., Timofeeva O.V., Katashevtseva D., Edemsky I.K. Dynamics of the level of total electron content disturbance at high and middle latitudes according to GPS data // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 1. P. 36–43. http://naukaru.ru/journal/issue/683. DOI: 10.12737/19878.

103.Potapov A.S., Ryzhakova L.V., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of "killer" electron flux at geosynchronous orbit // Acta Astronautica. 2016. V. 126. P. 47–51.

104.Potapov A.S., Dovbnya B.N., Baishev D.G., Polyushkina T.N., Rakhmatulin R.A. Narrow-band emission with 0.5 to 3.5 Hz varying frequency in the background of the main phase of the 17 March 2013 magnetic storm // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2, N 4. P. 13–23.

105.Potekhin A.P., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Setov A., Lebedev V.P. Prospective IS-MST radar. Potential and diagnostic capabilities // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 3. P. 3–21. http://naukaru.ru/journal/issue/811. DOI: 10.12737/22281.

106. Rudenko G.V., Dmitrienko I.S. Oscillations of vertically stratified dissipative atmosphere. II. Low frequency trapped modes // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 141. P.137–149.

107. Rudenko G.V., Dmitrienko I.S. Penetration of internal gravity waveguide modes into the upper atmosphere // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 1. P. 61–77. http://naukaru.ru/ journal/ issue/683. DOI: 10.12737/19879.

108. Rudiger G., Schultz M., Kitchatinov L.L. Instability of magnetized and differentially rotating stellar radiation zones with high magnetic Mach number // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2016. V. 456, N 3. P. 3004–3010.

109. Sedykh P.A., Ponomarev E.A. MHD modeling of processes in near-Earth space plasma // Magnetohydrodynamics. 2016. V. 52, N 1/2. P. 209–222.

110. Semenov A.I., Medvedeva I.V., Perminov V.I., Khomich V. Spatial and temporal variations in infrared emissions of the upper atmosphere. 1. Atomic oxygen (λ63 μm) emission // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 5. P. 616–620.

111. Sharykin I.N., Kuznetsov A.A. Modelling of nontermal microwave emission from twisted magnetic loops // Solar Phys. 2016. V. 291, N 5. P. 1341–1355.

112. Shefov N.N., Semenov A.I., Medvedeva I.V. Quasiperiodic oscillations in the atmospheres of the Sun, Earth, and Planets // Doklady Earth Sci. 2016. V. 468, N 1. P. 490.

113. Skomorovsky V.I., Kushtal G.I., Lopteva L., Proshin V., Trifonov V.D., Chuprakov S.A., Khimich V. Chromospheric telescope of Baikal Astrophysical Observatory. New light // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 2. P. 82–103. http://naukaru.ru/journal/issue/744/; DOI: 10.12737/ 21002.

114. Smolkov G.Ya. External factors of solar-terrestrial relations // Astron. Astrophys. Trans. 2016. V. 29, N 4. P. 1–27.

115. Soon W., Herrera V.M.V., Selvaraj K., Traversi R., Usoskin I.G., Chen C.T.A., Lou J.Y., Kao S.J., Carter R.M., Pipin V.V., Severi M., Becagli S. Corrigentum to "A review of Holocene solar-linked climatic variations on centennial to millenntial timescales: Physical processes, interpretative frameworks and a new multiple cross-wavelet transform algorithm". Earth Sci. Rev. 134 [1–15] // Earth Sci. Rev. 2016. V. 159. P. 462.

116. Sorokin A.G. Infrasound emission of the Chelyabinsk meteoroid (1st All-Russian Acoustic Conference) // Bull. Russian Academy of Sciences: Physics. 2016. V. 80, N 1. P. 93–97.

117. Tan B., Karlicky M., Meszarosova H., Kashapova L.K., Huang J., Yan Y., Kontar E.P. Diagnosing the source region of a solar burst on 26 September 2011 by using microwave type-III pairs // Solar Phys. 2016. V. 291, N 8. P. 2407–2418.

118. Tashchilin A.V., Leonovich L.A. Modeling nightglow in atomic oxygen red and green lines under moderate disturbed geomagnetic conditions at midlatitudes // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2, N 4. P. 76–84.

119. Tinin M.V. Wave reflection from randomly inhomogeneous ionospheric layer: 1. The method of describing the wavefield in a reflecting layer with random irregularities // Radio Sci. 2016. V. 51, N 8. P. 1350–1362.

120. Tlatov A.G., Pashchenko M.P., Ponyavin D.I., Svidskii P.M., Peshcherov V.S., Demidov M.L. Forecast of solar wind parameters according to STOP Magnetograph observations // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 8. P. 1095–1103.

121. Trunkovsky E.M., Gorbovskoy E.S., Denisenko D.V., Tsvetkov D.Y., Lipunov V.M., Yazev S.A., et al. The results of photometric recording of the occultation of the star HIP 97157 by asteroid (41) DAPHNE with the telescope of the Global MASTER robotic net // Astronomical J. 2016. V. 151, N 3. P. 72.

122. Tsap Y.T., Stepanov A.V., Kashapova L.K., Myagkova I.N., Bogomolov A.V., Kopylova Yu. G., Goldvarg T.B. Time delays in the nonthermal radiation of solar flares according to observations of the CORONAS-F satellite // Cosmic Res. 2016. V. 54, N 4. P. 285–289.

123. Valori G., Pariat E., Anfinogentov S., Chen F., Georgoulis M.K., Guo Y., Liu Y., Moraitis K., Thalmann J.K., Yang S. Magnetic helicity estimations in models and observations of the solar magnetic field. Part I: Finite volume methods // Space Sci. Rev. 2016. V. 201, N 1. P. 147–200.

124. Vasil'eva L.A., Molodykh S.I., Kovalenko V.A. Spatial structure of connection between the troposphere heat content and variations in solar and geomagnetic activities // Sun and Geosphere. 2016. V. 11, N 1. P. 55–59.

125. Voeykov S.V., Berngardt O.I., Shestakov N.V. Use of the index of TEC vertical variation disturbances in studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 2. P. 219–228.

126. Yazev S.A., Mordvinov A.V., Dvorkina-Samarskaya A. Corona during the total solar eclipse on March 20, 2015, and cycle development // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 2. P. 3–14. http://naukaru.ru/journal/issue/744/; DOI:10.12737/20995.

127. Yokoi N., Schmitt D., Pipin V.V., Hamba F. A new simple dynamo model for stellar activity cycle // Astrophys. J. 2016. V. 824, N 2. P. 67.

128. Zagainova Yu., Fainshtein V.G., Obridko V.N., Rudenko G.V. Magnetic field variations in the umbra of single sunspots during their passage according the solar disk // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56, N 8. P. 1015–1024.

129. Zakharov V.I., Yasyukevich Yu.V., Titova M.A. Effects of magnetic storms and substorms on GPS slips at high latitude // Cosmic Res. 2016. V. 54, N 1. P. 20–30.

130. Zhdanov D.A., Lesovoi S.V., Tokhchukova S.K. Sources of type III solar microwave bursts // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 2. P. 15–27. http://naukaru.ru/journal/issue/744. DOI: 10.12737/20996.

131. Zherebtsov G.A., Perevalova N.P. Ionospheric response to a rocket launch from the Vostochnyi Cosmodrome // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 471, N 2. P. 1280–1283.

132. Zolotukhina N.A., Kurkin V.I., Polekh N.M., Romanova E.B. Backscattering dynamics during intense geomagnetic storm as deduced from Yekaterinburg radar data: 17–22 March 2015 // Solar-Terrestrial Phys. 2016. V. 2, N 4. P. 24–42.

7.3. Доклады в сборниках российских конференций

1. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Григорьев В.М., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Коняев П.А., Копылов П.А., Кудряшов А.В., Лукин В.П., Русских И.В., Скоморовский В.И., Трифонов В.Д., Чупраков С.А., Шиховцев А.Ю. О современных результатах разработки и исследований адаптивных оптических систем солнечных телескопов // Научно-практическая конференция «Научное приборостроение — современное состояние и перспективы развития». Москва, 15–16 ноября 2016 г.: Сборник материалов. Москва, 2016. С. 100–102.

2. Башкирцев В.С., Машнич Г.П. Долговременная солнечная активность и прогноз климата Земли на 21-й век // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 225–233.

3. Безлер И.В., Ишин А.Б., Конецкая Е.В., Тинин М.В. Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 173–176. CD-ROM.

4. Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек в оптическом диапазоне длин волн // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 112–118.

5. Боровик А.В., Томозов В.М. Динамика лент эмиссии вспышек — индикатор процессов выделения энергии в токовых слоях // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 119–129.

6. Васильев Р.В., Глоба М.В., Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Модель сигнала дискретного космического радиоисточника для Иркутского радара некогерентного рассеяния // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 122–125. CD-ROM.

7. Глоба М.В., Васильев Р.В., Кашапова Л.К., Лебедев В.П., Кушнарев Д.С., Медведев А.В. Параметры распределения яркости по диску Солнца в метровом диапазоне длин волн, полученные Иркутским радаром некогерентного рассеяния // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 136–142.

8. Головко А.А. Применение фрактального анализа в актуальных задачах планетологии // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 52–58.

9. Губин А.В., Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Иванов Е.Ф. Многочастотный радиогелиограф // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 121-й годовщине Дня радио. Красноярск, 5–6 мая 2016 г. Красноярск, 2016. С. 55–59.

10. Демидов М.Л., Григорьев В.М., Ретюнский Л.Б., Скоморовский В.И., Денисенко С.А., Пименов Ю.Д., Липин Н.А., Сокольский М.Н. Солнечный синоптический телескоп (СОЛСИТ) — новый российский инструмент для исследований магнетизма Солнца // Научно-практическая конференция «Научное приборостроение — современное состояние и перспективы развития». Москва, 15–16 ноября 2016 г.: Сборник материалов. Москва, 2016. С. 46–47.

11. Дерес А.С., Анфиногентов С.А. Диагностика атмосферы солнечных пятен по наблюдениям трехминутных колебаний // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 143–150.

12. Добрынина А.А., Сорокин А.Г., Саньков В.А., Черных Е.Н., Чечельницкий В.В., Цыдыпова Л.Р., Тубанов Ц.А., Герман В.И., Улзийбат М. Сейсмоакустические эффекты Хубсугульского землетрясения 5 декабря 2014 г., MW=4.9 // 14 Всероссийское научное совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». Иркутск, 11–14 октября 2016 г.: Труды. Иркутск, 2016. С. 80–81.

13. Егоров Я.И., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. Вариации фотосферного магнитного поля, сопровождающие эруптивное событие 07.06.2011 // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», по-

священной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 151–157.

14. Едемский И.К. Динамика полного электронного содержания по данным SBAS за 2015 г. // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 170–172. CD-ROM.

15. Еселевич М.В., Караваев Ю.С., Коробцев И.В., Тергоев В.И., Цуккер Т.Г. Широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Научно-практическая конференция «Научное приборостроение — современное состояние и перспективы развития». Москва, 15–16 ноября 2016 г.: Сборник материалов. Москва, 2016. С. 272–274.

16. Загайнова Ю.С., Обридко В.Н., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. Сравнение магнитных свойств и площади тени ведущих и замыкающих пятен с различной асимметрией связывающего их магнитного поля // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». Санкт-Петербург, 10–14 октября 2016 г.: Труды. Санкт-Петербург, 2016. С. 113–116. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

17. Загайнова Ю.С., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Обридко В.Н. Меняются ли характеристики магнитного поля в тени солнечных пятен во время вспышек и корональных выбросов массы? // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». Санкт-Петербург, 10–14 октября 2016 г.: Труды. Санкт-Петербург, 2016. С. 117–120. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

18. Караханян А.А., Молодых С.И. Статистический анализ циклогенеза внетропических широт во время геомагнитных возмущений // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». Санкт-Петербург, 10–14 октября 2016 г.: Труды. Санкт-Петербург, 2016. С. 145–148. http://www.gao.spb.ru/ russian/solphys/2016.

19. Клименко М.В., Марков А.В., Абдуллаев А.Р., Чирик Н.В., Ратовский К.Г., Клименко В.В., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Панченко В.А. Вариации дневных значений NMF2 в январе 2008–2015 годов в зависимости от солнечной и геомагнитной активности // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 222–225. CD-ROM.

20. Климушкин Д.Ю. Иркутская астрошкола: первый опыт // Избранные проблемы астрономии. IV Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», посвященная 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г.: Материалы. Иркутск, 2016. С. 275–279.

21. Книжин С.И., Тинин М.В., Ткачев А.Д. Диагностика неоднородных детерминированных плазменных сред при помощи однократной пространственной обработки поля в условиях сильных вариаций фазы // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск. 2016. Т. 1. С. 184–187. CD-ROM.

22. Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Язев С.А. Климатические особенности потепления в северной полярной области // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 234–241.

23. Конецкая Е.В., Тинин М.В., Безлер И.В. Проблемы устранения ионосферной ошибки второго порядка в ГНСС-измерениях // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 162–165. CD-ROM.

24. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А., Рогов Д.Д., Челпанов М.А. Эффекты ионосферной бури 17–18 марта 2015 года в секторе обзора Екатеринбургского когерентного радара // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение ра-

диоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 143–146. CD-ROM.

25. Ларюнин О.А. Численный синтез серпообразных особенностей на ионограммах в рамках модели комбинированного параболического слоя // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 185–188. CD-ROM.

26. Медведев А.В., Толстиков М.В., Ратовский К.Г., Алсаткин С.С., Кушнарев Д.С. Исследование взаимодействия внутренних гравитационных волн с нейтральным ветром по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния и ионозонда DPS–4// XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 189–192. CD-ROM.

27. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Свойства потоков солнечного ветра в период минимума активности по изменениям отношения Fe/O с энергией ионов // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 177–185.

28. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Изменение отношения Fe/O с энергией ионов в структурах магнитных облаков при развитии мощных геомагнитных бурь // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 186–196.

29. Мордвинов А.В., Голубева Е.М. Формирование полярных корональных дыр в текущем цикле солнечной активности // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». Санкт-Петербург, 10–14 октября 2016 г.: Труды. Санкт-Петербург, 2016. С. 223–226. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

30. Муратова Н.О., Муратов А.А. Разработка и запуск нового солнечного спектрополяриметра (ССМД) для частотного диапазона 50–500 МГц в у. Бадары (Россия) // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 121-й годовщине Дня радио. Красноярск, 5–6 мая 2016 г. Красноярск, 2016. С. 216–220.

31. Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В. Тестирование методики определения абсолютного полного электронного содержания и градиентов ПЭС // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 147–150. CD-ROM.

32. Ойнац А.В., Бернгардт О.И., Толстиков М.В. Анализ характеристик среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по данным возвратно-нак-лонного зондирования КВ-радара Екатеринбург // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 203–207. CD-ROM.

33. Ойнац А.В., Васильев Р.В. Об идентификации сигналов приходящих с заднего сектора обзора когерентного КВ радара // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 271–274. CD-ROM.

34. Пензин М.С., Ильин Н.В. Тонкая структура доплеровского сдвига частоты при зондировании ионосферы // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 2. С. 199–201. CD-ROM.

35. Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В. Изменение интенсивности отклика ионосферы на прохождение солнечного терминатора в периоды действия тропических циклонов // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 113–116. CD-ROM.

36. Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Ляхов А.Н., Пензин М.С., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященной 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды. Томск, 2016. Т. 1. С. 131–134. CD-ROM.

37. Ратовский К.Г. Сравнение ионосферной возмущенности в высоких и средних широтах // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 101–104. CD-ROM.

38. Ратовский К.Г., Ясюкевич Ю.В., Полякова А.С. Особенности проявления зимней аномалии в полном электронном содержании и максимуме электронной концентрации // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 177–180. CD-ROM.

39. Седых П.А., Лобычева И.Ю. О влиянии экстремально-сильных геомагнитосферных возмущений на погоду // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 280–283.

40. Седых П.А. Как мы можем рассчитать параметры межзвездной среды за гелиосферной ударной волной? // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 90–97.

41. Скоморовский В.И., Кушталь Г.И., Прошин В.А., Лоптева Л.С. Солнечный фильтр — магнитограф с температурно-стабильной полосой пропускания // Научно-практическая конференция «Научное приборостроение — современное состояние и перспективы развития». Москва, 15–16 ноября 2016 г.: Сборник материалов. Москва, 2016. С. 247–249.

42. Смольков Г.Я. Роль и вклад эндогенной активности Земли в солнечно-земные связи // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 283–287.

43. Смольков Г.Я. Свидетельства внешнего воздействия на Землю и Солнечную систему в целом // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.: Материалы. Иркутск, 2016. С. 287–293.

44. Соколов Д.Д., Юшков Б.Ю., Лукин А.С., Абраменко В.И., Хлыстова А.И. Следы солнечного турбулентного динамо и статистика солнечных пятен // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». Санкт-Петербург, 10–14 октября 2016 г.: Труды. Санкт-Петербург, 2016. С. 291–294. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

45. Сорокин А.Г. О возбуждении вторичного источника АГВ на ионосферных высотах // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн»,

посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 3. С. 98–101. CD-ROM.

46. Сорокин А.Г., Добрынина А.А., Чечельницкий В.В. Анализ сейсмоакустических сигналов при импульсных событиях и землетрясениях // «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы результаты исследований на количественной основе». Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2016. С. 191–195.

47. Тинин М.В. Распространение волн в отражающем слое со случайными неоднородностями // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 109–112. CD-ROM.

48. Файнштейн В.Г., Загайнова Ю.С., Обридко В.Н., Руденко Г.В. Магнитные свойства солнечных пятен — новые сведения // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 204–210.

49. Файнштейн В.Г., Егоров Я.И., Руденко Г.В. Вариации фотосферного магнитного поля, сопровождающие эруптивное событие 07.06.11 // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». Санкт-Петербург, 10–14 октября 2016 г.: Труды. Санкт-Петербург, 2016. С. 325–328. http://www.gao.spb.ru/russian/ solphys/2016.

50. Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Мелич Й. Ионосферные эффекты зимних стратосферных струйных течений Северного полушария // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 135–138. CD-ROM.

51. Шпынев Б.Г. Учет рефракции и эффекта Фарадея в статистическом уравнении радиолокации УКВ-диапазона радиоволн // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 139–142. CD-ROM.

52. Язев С.А., Горбовский Е.С., Гресь О.А. и др. О работе Астрономической обсерватории ИГУ в 2012–2016 гг. // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 8–28.

53. Язев С.А., Исаева Е.С. Протонные вспышки в комплексах активности на Солнце // Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 22–24 ноября 2016 г. Иркутск, 2016. С. 211–218.

54. Ясюкевич Ю.В., Васильев Р.В., Веснин А.М., Глоба М.В., Ратовский К.Г. Проявление мелкомасштабных неоднородностей во время магнитной бури 22 июня 2015 г. на средних широтах // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 181–184. CD-ROM.

55. Ясюкевич Ю.В., Клименко М.В., Ратовский К.Г., Клименко В.В., Полякова А.С., Чирик Н.В., Лукьянова Р.Ю. Зимняя аномалия в полном электронном содержании и в электронной концентрации в максимуме F2-слоя по данным наблюдений и результатам модельных расчетов // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г.: Труды конференции. Томск, 2016. Т. 1. С. 259–262. CD-ROM.

7.4. Доклады в сборниках международных конференций

1. Abdullaev A., Klimenko M., Markov A., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Leshchenko V.S., Panchenko V.A. Linear and dual linear regression model of midlatitude daytime N_mF2 dependence from solar and geomagnetic activity // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 427–430. http://ais2016.ru/?page_id=16.

2. Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bol'basova L.A., Demidov M.L., Grigoryev V.M., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kudryashov A.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu., Trifonov V.D. Adaptive system for solar telescopes operating in the strongly turbulent atmosphere // Adaptive Optics Systems V. Edinburgh, 2016. P. 990932. (Proc. SPIE. V. 9909).

3. Botygina N.N., Kopylov E.A., Lukin V.P., Selin A.A., Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu. Seasonal variability of the astronomical seeing on the Large Solar Vacuum Telescope // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. # 100351K. (Proc. SPIE. V. 10035).

4. Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V., Kashkina T.V. Detecting the small-scale ionospheric irregularities based on GNSS data // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. # 1003574. (Proc. SPIE. V. 10035).

5. Edemskiy I.K. Effects of 1997–1998 global parameters leap in total electron content // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 234–236. http://ais2016.ru/?page_id=16.

6. Ishin A.B., Voeykov S.V. Registration of ionospheric response to operation of the engine of spacecraft “Progress” according to GNSS data // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. # 100357B. (Proc. SPIE. V. 10035).

7. Khabituev D.S., Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G. The ionospheric response on gravity waves generated by stratospheric jet stream // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 130–136. http://ais2016.ru/?page_id=16.

8. Klimenko M., Klimenko V., Bessarab F.S., Korenkov Y.N., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Zakharenkova I.E. Morphology and mechanisms of the ionospheric F region electron density disturbances during geomagnetic storm and sudden stratospheric warming // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 17–23. http://ais2016.ru/?page_id=16.

9. Klimenko M., Klimenko V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Yasyukevich Yu.V., Polyakova A.S., Chirik N., Lukianova R. Longitudinal variation of winter anomaly in the F2 peak electron density and its manifestations in topside ionosphere, plasmospheric and total electron content // Atmosphere, Ionosphere, Safety - 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 213–217. http://ais2016.ru/?page_id=16.

10. Klimenko M., Klimenko V., Karpachev A.T., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Chernyak I.V., Galkin I.A., Chirik N., Chugunin D.V. Satellite observation and modeling of longitudinal variations in the ionosphere F region, topside ionosphere, and plasmosphere during December solstice // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 462–468. http://ais2016.ru/?page_id=16.

11. Klimenko M., Korenkova N.A., Leschenko V.S., Markov A., Abdullaev A., Ratovsky K.G., Vesnin A.M. Daytime NmF2 anomalous dependence from solar activity in the middle and subauroral latitudes in January 2012–2016 // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, February 29 – March 4, 2016. Apatity: Proc. Apatity, 2016. P. 97–100. http:// pgia.ru:81/ seminar/Proc.html.

12. Kopylov E.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu. The study of variability of the atmospheric turbulence in the region of Lake Baikal // Adaptive Optics Systems V. Edinburgh, 2016. P. 99093S. (Proc. SPIE. V. 9909).

13. Kotrc P., Kupryuakov Yu.A., Barta M., Kashapova L.K., Liu W. Analysis of a limb eruptive event // Ground based solar observations in the space instrumentation Era. // Solar Physics Meeting: Proc. Portugal, University of Coimbra, 5–9 October, 2015: ASP, 2016. P. 51. (Astron. Society of the Pacific Conference Series. V. 504).

14. Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu., Lukin V.P., Bol'basova L.A. Some approaches to describe the vertical structure of air refraction index variations // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. # 100351P. (Proc. SPIE. V. 10035).

15. Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu., Lukin V.P. Site selection for modern ground based large telescopes // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. # 100351S. (Proc. SPIE. V. 10035).

16. Kurbatov G., Padokhin A., Yasyukevich Yu.V., Berbeneva N.A. Studying ionospheric TEC with signals of geostationary navigation and augumentation satellites // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 448–451. http://ais2016.ru/?page_id=16.

17. Laryunin O.A. Variations in radio signal phase at propagation in the parabolic layer of disturbed ionospheric plasma // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. # 10035OU. (Proc. SPIE; V. 10035).

18. Laryunin O.A. Observations of traveling ionospheric disturbances on the basis of vertical sounding // Материалы междунар. молодежной научно-практической конференции «Россия–Монголия» Иркутск, Россия, 16–21 мая 2016 г.; Улан-Батор, Монголия, 5–10 сентября 2016 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 185. http://elibrary.ru/item.asp?id=27479122.

19. Markov A., Abdullaev A., Klimenko M., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Leshchenko V.S., Vesnin A.M. N_mF2 dependence from solar and geomagnetic activity in the middle latitudes in January 2012–2015 // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 165–170. http:// ais2016.ru/?page_id=16.

20. Medvedev A.V., Tolstikov M.V., Ratovsky K.G., Alsatkin S.S., Kushnarev D.S. Case studies of IGW – Wind interaction in upper atmosphere // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 141–148. http://ais2016.ru/?page_id=16.

21. Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V. Validation of the technique foer estimation of absolute total electron content and its gradients // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 174–178. http://ais2016.ru/?page_id=16.

22. Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Berngardt O.I., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances using Hokkaido East and Ekaterinburg HF Radar Data // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 191–197. http://ais2016.ru/?page_id=16.

23. Perevalova N.P., Romanova E.B. High-latitude ionospheric trough: GPS observation and simulation // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 401–403. http://ais2016.ru/?page_id=16.

24. Polyakova A.S., Mylnikova A.A. TEC dynamics during sudden stratospheric warmings in Arctic Region // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 120–125. http://ais2016.ru/ ?page_id=16.

25. Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Kurkin V.I., Penzin M.S. Automatic processing and interpretation of backscatter ionosphere sounding ionograms // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. #100351E. (Proc. SPIE. V. 10035).

26. Ratovsky K.G., Klimenko M., Klimenko V. Statistics of daytime ionospheric disturbances in the recovery phase of magnetic storms from 2003–2016 Irkutsk Ionosonde data // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 158–160. http://ais2016.ru/?page_id=16.

27. Ratovsky K.G., Klimenko M., Klimenko V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V. Comparison of height – diurnal electron density variations between Irkutsk Incoherent Scatter Radar and GSM TIP and IRI models // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 482–486. http://ais2016.ru/?page_id=16.

28. Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S. Calculation of meridional neutral winds with Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IISR) // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 539–541. http://ais2016.ru/?page_id=16.

29. Tashchilin A.V., Leonovich L.A., Matafonov G.K. Generation of emissions in red and green lines of atomic oxygen with due regard to energetic electron precipitation in the night time mid-latitude ionosphere // 22nd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 30, Tomsk, Russia: Proc. Bellingham, WA: SPIE, 2016. # 100355F. (Proc. SPIE; V. 10035).

30. Tkachev A.D., Knizhin S., Tinin M.V. Calculation of the internal representation of the wave field scattering on local irregularities by means of animptotic methods // Материалы междунар. молодежной научно-практической конференции «Россия–Монголия». Иркутск, Россия, 16–21 мая 2016 г.; Улан-Батор, Монголия, 5–10 сентября 2016 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 188. http://elibrary.ru/item.asp?id=27479122.

31. Tkachev A.D., Vasilyev R.V. Photometer for synchronous measurements in conjunction with optical and radio physics facility // Материалы междунар. молодежной научно-практической конференции «Россия–Монголия». Иркутск, Россия, 16–21 мая 2016 г.; Улан-Батор, Монголия, 5–10 сентября 2016 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 189–190. http://elibrary.ru/item.asp?id=27479122.

32. Vasilyev R.V., Globa M.V., Kushnarev D.S., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Discrete radio source scintillations as method for ionosphere study at Irkutsk Incoherent Scattering Radar // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 217–221. http://ais2016.ru/?page_id=16.

33. Vesnin A.M., Klimenko M. Improving space weather prediction using IRTAM and GSM TIP // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 504–507. http://ais2016.ru/?page_id=16.

34. Yasyukevich Yu.V., Vasilyev R.V., Vesnin A.M., Globa M.V., Ratovsky K.G. Generating ionospheric irregularities during the 2015 June 22 magnetic storm // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 513–517. http://ais2016.ru/?page_id=16.

35. Zhivet'ev I.V., Yasyukevich Yu.V. Using network technology for studying the ionosphere // Atmosphere, Ionosphere, Safety – 2016. V Intern. Conference. Kaliningrad, 19–25 June, 2016: Proc. Kaliningrad, 2016. P. 237–240. http://ais2016.ru/?page_id=16.

36. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Больбасова Л.А., Голенева Н.В., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лукин В.П., Трифонов В.Д., Селин А.А., Сазонова П.В., Шиховцев А.Ю. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы

и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. P15–P21. CD-ROM.

37. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В., Сыренова Т.Е., Алешков В.М., Черепанов В.Б. Комплекс оптических инструментов на высокоширотной станции «Исток» ИСЗФ СО РАН // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. 162–167. CD-ROM.

38. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В., Сыренова Т.Е., Черепанов В.Б. Спектральные измерения собственного излучения ночного неба с помощью спектрографа SHAMROCK SR-3031// Физика окружающей среды. Материалы XII Междунар. школы молодых ученых им. А.Г. Колесника, посв. 80-летию отечественных ионосферных исследований. 3–8 июля 2016 г., Томск. Томск, 2016. С. 23–26. CD-ROM.

39. Ботыгина Н.Н., Копылов Е.А., Лукин В.П., Селин А.А., Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. О сезонной изменчивости атмосферной турбулентности в районе озера Байкал // Физика окружающей среды. Материалы XII Междунар. школы молодых ученых им. А.Г. Колесника, посв. 80-летию отечественных ионосферных исследований. 3–8 июля 2016 г., Томск. Томск, 2016. С. 50–53. CD-ROM.

40. Ботыгина Н.Н., Копылов Е.А., Лукин В.П., Селин А.А., Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. Сезонная изменчивость качества астрономического видения на Большом солнечном вакуумном телескопе // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. B346-B349. CD-ROM.

41. Грозов В.П., Пономарчук С.Н. Программный комплекс интерпретации данных возвратно-наклонного зондирования ионосферы // 11th International Conference on Intelligent Data Processing: Theory and Applications. 10–14 October, 2016. Spain, Barselona: Proc. 2016. http://mmro.ru/en/2016/04/15/iip-11-il-en/.

42. Демьянов В.В., Кашкина Т.В., Ясюкевич Ю.В. Использование фазовых измерений сигналов ГНСС для детектирования слабых мелкомасштабных ионосферных возмущений // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. D259–D262. CD-ROM.

43. Едемский И.К. Динамика полного электронного содержания по данным SBAS за 2015 г. // Физика окружающей среды. Материалы XII Междунар. школы молодых ученых им. А.Г. Колесника, посв. 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 3 – 8 июля 2016 г., Томск, 2016. С. 70–74. CD-ROM.

44. Едемский И.К., Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В. Наблюдение эффектов солнечного терминатора в ПЭС в период действия тайфунов // VII Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Доклады. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 93–96.

45. Ишин А.Б., Воейков С.В. Регистрация ионосферного отклика на включение двигателей космического корабля «Прогресс» по данным ГНСС // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. D180–D183. CD-ROM.

46. Калиткина А.И., Липко Ю.В. Динамика магнитных полюсов Земли и вековой ход по данным магнитной обсерватории «Иркутск» // Материалы междунар. молодежной научно-практической конференции «Россия – Монголия». Иркутск, Россия, 16–21 мая 2016 г., Улан-Батор, Монголия, 5–10 сентября 2016 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 162–164. http://elibrary.ru/item.asp?id= 27479122

47. Клименко М.В., Клименко В.В., Карпачев А.Т., Чирик Н.В., Захаренкова И.Е., Веснин А.М. Структура главного ионосферного провала в ночное время зимой в спокойных геомагнитных условиях // Физика окружающей среды. Материалы XII Междунар.

школы молодых ученых им. А.Г. Колесника, посв. 80-летию отечественных ионосферных исследований. 3 – 8 июля 2016 г., Томск. Томск, 2016. С. 83–87. CD-ROM.

48. Клименко М.В., Клименко В.В., Ясюкевич Ю.В., Ратовский К.Г., Чирик Н.В., Полякова А.С., Лукьянова Р.Ю. Зимняя аномалия в N_mF2 и в полном электронном содержании. 2. Механизмы формирования долготной вариации зимней аномалии // VII Междунар. конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Доклады. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 42–45.

49. Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Лукин В.П. О некоторых способах описания изменений показателя преломления воздуха с высотой // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. B191–B194. CD-ROM.

50. Ковадло П. Г., Шиховцев А.Ю., Лукин В.П. Выбор новых мест для строительства современных наземных телескопов // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. B286–B289. CD-ROM.

51. Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Атмосфера над Норильском в период 2003–2013 гг. // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. D318–D321. CD-ROM.

52. Ларюнин О.А. О вариациях фазы радиосигнала при распространении в параболическом слое ионосферной плазмы с возмущением // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. B16–B19. CD-ROM.

53. Ларюнин О.А., Колесник С.А. Численное моделирование распространения радиосигнала в нестационарной ионосфере методом FDTD // Физика окружающей среды. Материалы XII Междунар. школы молодых ученых им. А.Г. Колесника, посв. 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 3 – 8 июля 2016 г. Томск, 2016. С. 138–142. CD-ROM.

54. Молодых С.И. Закономерности изменения пространственной структуры отклика ПТВ на вариации геомагнитной активности // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. D290–D293. CD-ROM.

55. Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В. Сравнение результатов методики Tau-AbsTEC с данными Глобальных ионосферных карт // VII Междунар. конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Доклады. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 145–148.

56. Подгорный А.И., Мешалкина Н.С. Конфигурация магнитного поля в короне во время солнечной вспышки и источники рентгеновского излучения для активной области 10365 // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, February 29 – March 4, 2016: Proc. Apatity, 2016. P. 78–83. http://pgia.ru:81/seminar/Proc.html.

57. Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В., Мыльникова А.А. Анализ регулярных вариаций ПЭС в Восточно-Сибирском регионе // Материалы междунар. молодежной научно-практической конференции «Россия–Монголия». Иркутск, Россия, 16–21 мая 2016 г., Улан-Батор, Монголия, 5–10 сентября 2016 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 192–193. http://elibrary.ru/item.asp?id=27479122.

58. Пономарчук С.Н., Ким А.Г., Котович Г.В., Романова Е.Б. Применение модели ионосферы и плазмосферы для моделирования ионограмм наклонного зондирования с учетом перемежающихся ионосферных возмущений // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. B6–B10. CD-ROM.

59. Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В., Куркин В.И., Пензин М.С. Автоматическая обработка и интерпретация ионограмм возвратно-наклонного зондирования ионосферы // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С.B11–B15. CD-ROM.

60. Ратовский К.Г., Щербаков А.А., Алсаткин С.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Сравнительный анализ измерения электронной концентрации во внешней ионосфере // VII Междунар. конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Доклады. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 149–152.

61. Семенов А.И., Медведева И.В., Перминов В.И., Хомич В.Ю. Пространственно-временные вариации эмиссии 63 мкм атомарного кислорода // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. D476–D479. CD-ROM.

62. Смольков Г.Я. Эндогенная активность Земли в солнечно-земных связях // XIV Междунар. научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки в XXI веке». Москва, 30 сентября 2016 г.: Сб. докладов. М.: Международная исследовательская организация «Cognitio», 2016. Ч. 2. С. 43–48.

63. Тащилин А.В., Леонович Л.А., Матафонов Г.К. Генерация эмиссий в красной и зеленой линиях атомарного кислорода при наличии высыпаний энергичных электронов в ночной среднеширотной ионосфере // XXII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Материалы. Томск, 2016. С. D404–D407. CD-ROM.

64. Ткачев А.Д., Книжин С.И., Тинин М.В. Численные расчеты фазы и амплитуды рассеянной волны на локальных неоднородностях при помощи асимптотических методов // Физика окружающей среды. Материалы XII Междунар. школы молодых ученых им. А.Г. Колесника, посв. 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 3–8 июля 2016 г. Томск, 2016. С. 173–176. CD-ROM.

65. Яковлева О.Е., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Весенне-осенняя асимметрия в геомагнитных возмущениях в период подъема солнечной активности (2010–2015 гг.) на высотах ионосферного слоя F1 (ст. Иркутск) // Физика окружающей среды. Материалы XII Междунар. школы молодых ученых им. А.Г. Колесника, посв. 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 3–8 июля 2016 г. Томск, 2016. С. 200–203. CD-ROM.

66. Ясюкевич Ю.В., Ратовский К.Г., Чирик Н.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Полякова А.С., Лукьянова Р.Ю. Зимняя аномалия в N_mF2 и в полном электронном содержании. 1. Морфология явления по данным наблюдений и результатам модельных расчетов // VII Междунар. конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Доклады. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 37–41.

67. Ясюкевич Ю.В., Васильев Р.В., Веснин А.М., Глоба М.В., Ратовский К.Г. Крупномасштабные и мелкомасштабные неоднородности, генерируемые во время главной фазы магнитной бури 22 июня 2015 г. // VII Междунар. конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Доклады. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 68–72.

68. Ясюкевич Ю.В., Захаров В.И., Демьянов В.В., Астафьева Э.И., Веснин А.М., Сыроватский С.И., Падохин А.М., Живетьев И.В. Влияние космической погоды на функционирование глобальных навигационных спутниковых систем // Материалы междунар. молодежной научно-практической конференции «Россия–Монголия». Иркутск, Россия, 16–21 мая 2016 г., Улан-батор, Монголия, 5–10 сентября 2016 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 194–195. http://elibrary.ru/item.asp?id= 27479122.

7.5. Тезисы докладов на российских конференциях

1. Анфиногентов С.А., Колотков Д.Ю., Накаряков В.М. EMD-анализ случайных процессов в солнечной атмосфере // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

2. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Васильев Р.В., Михалев А.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В., Леонович В.А., Сыренова Т.Е., Ташлыков В.П. Анализ возмущений в верхней атмосфере на основе данных одновременных наблюдений радиофизическими и оптическими методами // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 413.

3. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Сыренова Т.Е., Татарников А.В., Ташлыков В.П. Оптические наблюдения среднеширотного сияния 17 марта 2015 г. // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016.

4. Больбасова Л.А., Шиховцев А.Ю. Оценка астроклиматических параметров с использованием данных реанализа NCEP/NCAR // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016.

5. Больбасова Л.А., Ковадло П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Шиховцев А.Ю. Местная модель турбулентности для точки стояния БСВТ // XXIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». 29 ноября — 2 декабря 2016 г., Томск: Тез. докл. Томск, 2016. С. 107. http://symp.iao.ru/ru/sa/23/i1.

6. Ботыгина Н.Н., Копылов Е.А., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. Сезонное изменение качества астрономического видения Большого солнечного вакуумного телескопа // VI Пулковская молодежная астрономическая конференция. 6–8 июня 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. 2016. http://younggao.ru/theses.

7. Бубнов Г.М., Быков В.Ю., Вдовин В.Ф., Данилевский Д.Б., Зинченко И.И., Ильин Г.Н., Луковникова А.А., Марухно А.С., Носов В.И., Шанин Г.Н. Результаты длительных исследований миллиметрового астроклимата в Бадарах и на Суффе и перспективы реализации наземных радиоастрономических наблюдений на длинах волн до 1 мм // IV Всеросс. микроволновая конференция. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва. 23–25 ноября 2016 г.: Тез. докл. М., 2016. С. 379. http://microwaveweek.ru/?page_id=23.

8. Воейков С.В., Ишин А.Б. Зависимость амплитуды вариаций ПЭС от угла места и азимута на спутник по данным Иркутской станции GPS/ГЛОНАСС // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 416.

9. Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Копылов Е.А., Кудряшов А.В., Лукин В.П., Шиховцев А.Ю. Исследования спектрального состава турбулентных оптических искажений по наблюдениям на АСТ и БСВТ // XXIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». 29 ноября — 2 декабря 2016 г., Томск: Тез. докл. Томск, 2016. С. 111. http://symp.iao.ru/ru/sa/23/i1.

10. Григорьева И.Ю., Лившиц М.А., Мышьяков И.И., Руденко Г.В. Начальная стадия формирования сигмоида // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 7–8. http://plasma2016.cosmos.ru/.

11. Егоров Я.И., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Анфиногентов С.А. О вариациях фотосферного магнитного поля в области солнечной вспышки по данным векторных измерений поля инструментом SDO/HMI // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика

плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 10. http://plasma2016.cosmos.ru/.

12. Жеребцов Г.А., Потехин А.П., Ратовский К.Г., Медведев А.В., Кушнарев Д.С., Подлесный А.В., Бернгардт О.И., Толстиков М.В., Щербаков А.А., Алсаткин С.С., Веснин А.М., Медведева И.В., Михалев А.В., Золотухина Н.А., Рахматулин Р.А., Головко А.А., Куркин В.И., Иванова В.А., Кутелев К.А. Космическая погода в марте–апреле 2016 г. (по данным гелиогеофизического комплекса ИСЗФ СО РАН) // Всероссийская конференция. «Гелиогеофизические исследования в Арктике». 19–23 сентября 2016 г., Мурманск: Сб. тез. докл. Апатиты, 2016. С. 19. http://pgia.ru/gelio_in_arctic/.

13. Загайнова Ю.С., Файнштейн В.Г., Обридко В.Н., Руденко Г.В., Анфиногентов С.А. Сравнительный анализ магнитных свойств и площади тени ведущих и замыкающих пятен с различной асимметрией связывающего их магнитного поля // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 10–11. http://plasma2016.cosmos.ru/.

14. Загайнова Ю.С., Обридко В.Н., Файнштейн В.Г. Сравнительный анализ магнитных свойств и площади тени ведущих и замыкающих пятен с различной асимметрией связывающего их магнитного поля // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. С. 32. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

15. Загайнова Ю.С., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. Меняются ли характеристики магнитного поля в тени солнечных пятен во время вспышек и корональных выбросов массы? // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. С. 32–34. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

16. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Игнатов К.А., Шевелева Е.Н. Влияние солнечной и геомагнитной активности на GPS/GLONASS-измерения в высоких широтах // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 151. http://plasma2016.cosmos.ru/.

17. Зимовец И.В., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. Регистрация выброса из конвективной зоны магнитной трубки с холодной плазмой — источника формирования «импульсного» коронального выброса массы // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 31. http://plasma2016.cosmos.ru/.

18. Ишин А.Б., Воейков С.В. Сравнение устойчивости приема сигналов GPS и ГЛОНАСС по данным сети станций ИСЗФ СО РАН // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 418.

19. Ишин А.Б., Воейков С.В. Проявление ионосферных эффектов работы двигателя корабля «Прогресс» в данных ГНСС // III Всероссийская научно-практическая конференция «Системы связи и радионавигации». 22–23 сентября 2016 г., Красноярск: Сб. тез. докл. Красноярск, 2016. С. 161–164. http://www.vntconference.ru/.

20. Кальтман Т.И., Колобов Д.Ю., Кочанов А.А., Мышьяков И.И., Томин В.Е., Киселев А.В., Пуляев В.А. Исследование атмосферы активной области NOAA 12436 по данным микроволновых наблюдений и измерений вектора магнитного поля в линиях FeI и CaII // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 31–32. http://plasma2016.cosmos.ru/.

21. Караханян А.А., Молодых С.И. Статистический анализ циклогенеза внетропических широт во время геомагнитных возмущений // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. http://www.gao.spb.ru/russian/ solphys/2016/.

22. Кичатинов Л.Л., Олемской С.В. Модель динамо глобальных максимумов солнечной активности: возможны ли супервспышки на Солнце? // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

23. Кичатинов Л.Л. Объединенная модель динамо и дифференциального вращения // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

24. Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г., Захаренкова И.Е., Ясюкевич Ю.В. Долготная зависимость возмущений *f*oF2 и TEC во время геомагнитных бурь // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИРИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 68–69. http://plasma2016.cosmos.ru/.

25. Климушкин Д.Ю., Магер П.Н., Костарев Д.А., Челпанов М.А. Дрейфовые компрессионные моды в магнитосфере // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИРИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 118. http://plasma2016.cosmos.ru/.

26. Комарова Е.С., Михалев А.В., Иванов К.И., Белецкий А.Б. Модуляция яркости метеорных треков короткопериодическими ВГВ // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016.

27. Кудрявцева А.В., Просовецкий Д.В. Вероятные области генерации потоков солнечного ветра по данным STEREO и SDO // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИРИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 34. http://plasma2016.cosmos.ru/.

28. Курбатов Г.А., Нестеров И.А., Падохин А.М., Туматова Ю.С., Ясюкевич Ю.В. Вариации TEC в районе о. Тайвань в период действия тропических циклонов в сентябре 2016 года по данным радиотомографии и геостационарных навигационных спутников COMPASS/Beidou // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 423.

29. Лебедев В.П., Кутелев К.А., Гркович К.В., Кушнарев Д.С., Бернгардт О.И. Первые результаты исследования высокоширотного ионосферного радиоэха в УКВ- и КВ-диапазонах по данным радаров ИСЗФ СО РАН // Всероссийская конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике». 19–23 сентября 2016 г., Мурманск: Сб. тез. докл. Апатиты, 2016. С. 27. http://pgia.ru/gelio_in_arctic/.

30. Ляхов А.Н., Козлов С.И., Беккер С.З., Пономарчук С.Н., Тащилин А.В., Романова Е.Б., Куркин В.И., Пензин М.С. Вероятностные модели ионосферы для ЗГРЛС КВ диапазона // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 154. http://plasma2016.cosmos.ru/.

31. Медведева И.В., Ратовский К.Г. Влияние метеорологических возмущений в феврале–марте 2016 г. на состояние верхней нейтральной атмосферы и ионосферы // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 424.

32. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Изменение значений Fe/O различных энергий ионов при развитии импульсных и длительных потоков ускоренных частиц // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 40. http://plasma2016.cosmos.ru/.

33. Мордвинов А.В., Голубева Е.М. Формирование полярных корональных дыр в текущем цикле солнечной активности // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. С. 59. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

34. Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В. Тестирование методики определения абсолютного вертикального полного электронного содержания – TayAbsTEC // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 425.

35. Накаряков В.М., Анфиногентов С.А., Зимовец И.В. Изгибные колебания плазменных петель короны Солнца: статистика, нелинейность и автоколебания // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

36. Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Довбня Б.В., Яхнин А.Г., Суворова А.В., Пашинин А.Ю., Чиликин В.Э. Глобальный импульсный всплеск геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–5 Гц как предвестник внезапного начала геомагнитной бури святого Патрика 17.03.2015 // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 109. http://plasma2016.cosmos.ru/.

37. Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Воейков С.В., Захаров В.И., Перевалова Н.П., Титков Н.Н., Демьянов М.О. Стабильность глобальных навигационных спутниковых систем в условиях ионосферной и магнитосферной возмущенности // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 432.

38. Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В. Ионосферные вариации во время действия тайфуна Lionrock по данным GPS/ГЛОНАСС // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 433.

39. Полякова А.С., Черниговская М.А., Мыльникова А.А. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности по данным GPS/ГЛОНАСС над регионом Восточной Сибири // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 430.

40. Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В., Мыльникова А.А. Регулярные вариации ПЭС в среднеширотном и полярном регионах // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016.

41. Полех Н.М., Иванова В.А., Черниговская М.А. Изменчивость ионосферы над Восточной Сибирью по данным наклонного зондирования // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 429.

42. Просовецкий Д.В., Просовецкая Н.А. Температурные характеристики источников короткопериодических колебаний спокойного Солнца // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 19. http://plasma2016.cosmos.ru/.

43. Семенов А.И., Медведева И.В., Перминов В.И., Сидаш В.Б. Вариации инфракрасного излучения (63 мкм) атомарного кислорода O (3P) в верхней атмосфере // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016.

44. Сетов А.Г., Медведев А.В., Лебедев В.П., Кушнарев Д.С. Расчет потенциала перспективного радара НР–МСТ при исследовании нижней и средней атмосферы // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанци-

онного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 436.

45. Соколов Д.Д., Абраменко В.И., Хлыстова А.И. Следы солнечного турбулентного динамо и статистика солнечных пятен // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

46. Ташлыков В.П., Медведев А.В. Особенности характеристик регистрируемого сигнала на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016.

47. Тясто М.И., Данилова О.А., Вернова Е.С., Сдобнов В.Е. Изменения жесткостей обрезания космических лучей под воздействием сильного геомагнитного возмущения в марте 2012 г. // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 105. http://plasma2016.cosmos.ru/.

48. Тлатов А.Г., Свидский П.М., Демидов М.Л. Моделирование и прогноз параметров солнечного ветра по данным наблюдений магнитографа СТОП // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИРИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 160. http://plasma2016.cosmos.ru/.

49. Файнштейн В.Г., Егоров Я.И., Руденко Г.В. Вариации фотосферного магнитного поля, сопровождающие эруптивное событие 07.06.11 // XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016». 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. СПб., 2016. http://www.gao.spb.ru/russian/solphys/2016/.

50. Хабитуев Д.С., Шпынев Б.Г., Татарников А.В., Щеглова Е.С. Влияние гравитационного прилива Солнца и Луны на динамику параметров атмосферы, ионосферы и океана // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 441.

51. Челпанов М.А., Магер П.Н., Бернгардт О.И., Магер О.В., Климушкин Д.Ю. Экспериментальные свидетельства дрейфово-компрессионных волн в магнитосфере // Всероссийская кон. «Гелиогеофизические исследования в Арктике». 19–23 сентября 2016 г., Мурманск: Сб. тез. докл. Апатиты, 2016. С. 46. http://pgia.ru/ gelio_in_arctic/.

52. Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Золотухина Н.А., Полех Н.М., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Мелич Й. Отклик ионосферы на сильную геомагнитную бурю в марте 2015 года по данным евразийской цепи ионозондов // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: Тез. докл. М., 2016. С. 442.

53. Чернов Г.П., Фомичев В.В., Сыч Р.А. Новые результаты исследований зебраструктуры в солнечном радиоизлучении // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 24. http://plasma2016.cosmos.ru/.

54. Чирик Н.В., Клименко В.В., Клименко М.В., Карпачев А.Т., Захаренкова И.Е., Веснин А.М., Ратовский К.Г., Степанов А.Е., Коренькова Н.А. Долготная зависимость суточных аномалий электронной концентрации в F2-слое ионосферы на средних и авроральных широтах // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 88. http://plasma2016.cosmos.ru/.

55. Шиндин А.В., Когогин Д.А., Белецкий А.Б., Грач С.М., Клименко В.В., Насыров И.А., Сергеев Е.Н. Оптическое свечение ионосферы при воздействии мощным КВ-радиоизлучением: пространственные характеристики при двухпозиционных наблюдениях; особенности при частоте воздействия вблизи 4-й электронной гирогармоники // Одинна-

дцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 63. http://plasma2016.cosmos.ru/.

56. Шиховцев А.Ю., Еселевич М.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П. Исследование качества изображений в приложении к адаптивной оптике в горных районах Сибири // VI Пулковская молодежная астрономическая конференция. 6–8 июня 2016 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург: Тез. докл. 2016. http://younggao.ru/theses.

57. Ясюкевич Ю.В., Васильев Р.В., Ратовский К.Г., Веснин А.М., Глоба М.В., Федотова А.Ю. Регистрация неоднородностей электронной концентрации различных масштабов во время магнитной бури 22 июня 2015 г. // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15–19 февраля 2015 г., ИКИ РАН, Москва: Сб. тез. докл. М., 2016. С. 75. http://plasma2016.cosmos.ru/.

7.6. Тезисы докладов на международных конференциях

1. Afanasyev A., Zhukov A. Numerical simulations of large-scale coronal wave interaction with coronal magnetic structures // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium “Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future”. Hvar, Croatia, 26–30 September, 2016: Abstracts. 2016. http://oh.geof.unizg.hr/index.php/en/meetings/xivth-hac.

2. Afanasyev A. Slow magnetoacoustic waves in coronal plasma structures // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 4. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

3. Aleshkov V. M., Lukovnikova A.A., Lysak A.C. Sayan Cosmic Ray Spectrograph and monitoring of electromagnetic environment in interplanetary space and the Earth's atmosphere // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 40. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

4. Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Applying 2 D motion magnification to EUV observations of the low-amplitude kink oscillations // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 5. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

5. Anfinogentov S., Nakariakov V.M., Nistico G. Decayless regime of the coronal loop kink oscillations // Dynamic Processes in Space Plasmas. Ben-Gurion University, Israel. April 3–10, 2016: Abstracts. 2016. http://ssg.grouP.shef.ac.uk/Conferences/Israel_2016/ Participations.php.

6. Berngardt O.I., Grkovich K., Fedorov R.R. A technique for improvement of multipulse HF radar sounding capabilities when simultaneously observing ionospheric processes with different temporal scales // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, February 29 – March 4, 2016: Abstracts. Apatity, 2016. http://pgia.ru:81/ seminar/Abstracts.html.

7. Borodkova N.L., Eselevich V.G., Zastenker G.N., Sapunova O.V., Safrankova J., Nemecek Z., Prech, L. Fine structure of the interplanetary shock front from the plasma measurements // AOGS 13th Annual Meeting. Asia Oceania Geoscience Society. Beijing, Cjina, July 31– August 5, 2016: Abstracts. 2016. Ст. ST22-36-D4-AM1-307A(L3N)-005(ST22-A004). http://www.asiaoceania.org/aogs2016/public.asp?page=Program.htm.

8. Borodkova N.L., Parkhomov V.A., Eselevich V.G., Yermolaev Yu.I. Large and sharp increases in sporadic solar wind dynamic pressure and their effect on the Earth magnetosphere // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium “Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future”. Hvar, Croatia, September 26–30, 2016: Abstracts. 2016. http://oh.geof.unizg.hr/index.php/en/ meetings/xivth-hac.

9. Chelpanov M. Frequency distribution of Pc5 range waves in the magnetosphere observed with Ekaterinburg decameter radar // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). Seoul, South Korea, August 21–25, 2016: Program. 2016. G2-2. http://aprasc2016.org/Program_at_a_Glance.php.

10. Chelpanov A. A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. Facular magnetic knots as channels for wave propagation // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 8. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

11. Chernigovskaya M. A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V., Korenkova N.A., Leschenko V.S. Ionosphere response to the winter stratospheric jet stream in the northern hemisphere from vertical radio sounding data // First VarSITI General Symposium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Book of Abstracts. 2016. P. 36. http://newserver.stil.bas.bg/VarSITI2016/.

12. Chupin S.A., Kobanov N.I., Chelpanov A.A. Observations of torsional Alfven waves in solar faculae // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium "Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future". Hvar, Croatia, 26–30 September, 2016: Abstracts. 2016. http:// oh.geof.unizg.hr/index.php/en/meetings/xivth-hac.

13. Chupin S. A., Kobanov N.I., Chelpanov A.A. Search for the observational manifestations of torsional Alfven waves in solar faculae // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 9. http:// radiosun5.asu.cas.cz/.

14. Demidov M. L., Wang X.F., Kiselev A.V. Diagnostics of the quiet sun magnetic field properties by comparison of measurements on STOP (Russia) and SMART (China) instruments // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 6. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

15. Demidov M. L., Kiselev A.V. On the time variations of the weak and strong components of solar magnetic fields // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 6. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

16. Demidov M.L. On the cross-calibration of the HSOS SMAT full disk longitudinal magnetograms with data sets from some other instructions // Solar Polarization Workshop – 8. Firenze, 12–16 September, 2016: Program. 2016. http://www.astro.unifi.it/ SPW8/ Program.pdf.

17. Demidov M.L. On the time variations of magnetic strengths ratios in different combinations of spectral lines // Solar Polarization Workshop – 8. Firenze, 12–16 September, 2016: Program. 2016. http://www.astro.unifi.it/ SPW8/ Program.pdf.

18. Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V., Kashkina T.V. Detecting the small-scale ionospheric irregularities based on GNSS data // AOGS 13th Annual Meeting. Asia Oceania Geoscience Society. Beijing, Cjina, July 31 –August 5, 2016: Abstracts. 2016. Ст. ST29-D5-PM2-307A(L3N)-014(ST29-A007). http://www.asiaoceania.org/aogs2016/public.asp?page=Program.htm.

19. Deres A., Anfinogentov S., Afanasyev A., Pascoe D.J. Diagnostics of the temperature distribution in coronal fans using slow MHD waves // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016.: Abstracts. 2016. P. 10. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

20. Devyatova E.V. Geomagnetic activity and circulation dynamics in the winter time stratosphere // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 33. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

21. Egorov Ya. I., Fainshtein V.G., Rudenko G.V., Anfinogentov S. Magnetic field variations in the vicinity of a CME-associated solar flare on June 7, 2011 // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium "Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future". Hvar, Croatia, 26–30 September, 2016.: Abstracts. 2016. http://oh.geof.unizg.hr/index.php/en/ meetings/xivth-hac.

22. Globa M. V., Reid H.A.S., Kashapova L.K., Vasilyev R.V., Lebedev V.P. , Kushnarev D.S., Medvedev A.V. The first results of the 2D solar observations obtained by Irkutsk Incoherent Scatter Radar // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. Universite d'Orleans, France, 13–17 June 2016: Abstracts. 2016. http://cesra2016. sciences-conf.org/conference/cesra2016/pages/CESRA2016_prog_abs_book_v1.pdf.

23. Grechnev V.V., Kochanov A.A. Spatially resolved microwave observations of a major long-duration flare with the Siberian Soalr Radio Telescope // RadioSun-5 Workshop and Sum-

mer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 16. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

24. Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V., Kochanov A.A. Multi-loop structure of microwave sources in a major long-duration flare // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 17. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

25. Ivanova V.A., Kurkin V.I. Large - scale and medium-scale traveling ionospheric distur-bances registered during magnetic storms over North-Eastern region of Russian Federation // COSPAR 41st Scientific Assembly 2016. Istanbul, Turkey, 30 July – 7 August 2016: Abstracts. 2016. Ст. C1.1-0086-16. P. 104. https://www.cospar-assembly.org/ show_infopage.php?info=52.

26. Karpachev A.T., Klimenko V.V., Klimenko M., Chirik N., Vasiliev R.V., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Ratovsky K.G., Galkin I.A. The latitudinal and longitudinal variability of the ionospheric electron density at sub-auroral and high latitudes during solstice conditions // XXXIX Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". Apatity, February 29 – March 4, 2016: Abstracts. Apatity, 2016. http://pgia.ru:81/seminar/Abstracts.html.

27. Kashapova L. K., Kupriyanova E.G., Xu Z. About origin of oscillations of circular ribbon flare // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 5. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

28. Kashapova L. K., Kupriyanova E.G., Xu Z., Zhdanov D.A. Quasi-periodic pulses in the circular ribbon flare as indicator of acceleration processes // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium "Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future". Hvar, Croatia, 26–30 September, 2016. Abstracts. 2016. http://oh.geof.unizg.hr/index.php/en/meetings/xivth-hac.

29. Kashapova L.K., Kotrc P., Kupryakov Y.A., Barta M. Analysis results of the limb eruptive events as a signature of a flux-rope formation // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 20. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

30. Kashapova L.K., Lysenko A., Rudel A., Sokolova Z., Tsvetkova A.E. Characteristics of evolution of the hard X-ray and microwave emission of the solar flare occurred in AR 10375 in June 2003 // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 20. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

31. Klimenko M., Klimenko V., Despirak I., Ratovsky K.G., Zakharenkova I.E., Korenkova N.A., Kozelov B. Geomagnetic and ionospheric disturbances during St. Patrick's day geomagnetic storms in 2013 and 2015 // First VarSITI General Symposium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Abstracts. 2016. http://newserver.stil.bas.bg/VarSITI2016/.

32. Klimenko M., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G. Mid- and low-latitude ionospheric F region response to geomagnetic storms at equinox // AOGS 13th Annual Meeting. Asia Oceania Geoscience Society. Beijing, Cjina, July 31 – August 5, 2016: Abstracts. 2016. Ст. ST41-D2-AM2-311B(L3N)-013(ST41-A031). http://www.asiaoceania.org/aogs2016/public.asp?page=Program.htm.

33. Klimenko M., Klimenko V., Despirak I., Ratovsky K.G., Zakharenkova I.E., Korenkova N.A., Kozelov B. Auroral, geomagnetic, and ionospheric disturbances during St. Patrick's Day geomagnetic storms // Eighth Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere". Sunny Beach. Bulgaria, May 30 – June 3, 2016: Book of Abstracts. Sunny Beach, 2016. P. 3. http://ws-sozopol.stil.bas.bg/.

34. Knizhin S. Improving the resolution of diagnostics of inhomogeneous plasma media in conditions of strong phase variations // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). August 21–25, 2016. Seoul, South Korea: Program. 2016. S-B13b-5. P. 74. http://aprasc2016.org/Program_at_a_Glance.phP.

35. Kobets V.S., Kochanov A.A., Ivanov E.F., Lesovoi S.V. The software correlator for the Siberian Radioheliograph // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 21. http://radiosun5. asu.cas.cz/.

36. Kontar E.P., Yu S., Kuznetsov A.A., Chen X., Yan Y., Melnik V. Imaging spectroscopy of fine structures with LOFAR: Implication for radio wave propagation // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. Universite d'Orleans, France, 13–17 June 2016: Abstracts. 2016. http://cesra2016.sciencesconf.org/conference/ cesra2016/pages/ CESRA2016_prog_abs_book_v1.pdf.

37. Kravtsova M., Sdobnov V.E. Diagnostics of interplanetary space as deduced from ground-based cosmic-ray observations during huge geomagnetic storms in the 23rd solar cycle // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 36. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

38. Kudryavtseva A., Prosovetsky D.V. Definition of the solar wind dynamical characteristics and its sources by STEREO and SDO data // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium "Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future". Hvar, Croatia, 26 – 30 September, 2016: Abstracts. 2016. http://oh.geof.unizg.hr/index.php/en/meetings/xivth-hac.

39. Kupriyanova E.G., Kashapova L.K., Reid H.A.S., Myagkova I.N. Diagnostics of the acceleration modulation process based on analysis of the type III bursts and quasiperiodic variations of the flare emission // IBUKS 2016: Waves and Oscillations in the Solar Atmosphere. Leuven, Belgium, June 13–16, 2016: Abstracts. 2016. https:// wis.kuleuven. be/events/IBUKS2016.

40. Kupriyanova E.G., Reid H.A.S., Kashapova L.K., Myagkova I.N. Diagnostics of the acceleration modulation process based on quasi-periodic variations of flare emission // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. Universite d'Orleans, France, 13–17 June 2016: Abstracts. 2016. http://cesra2016.sciencesconf.org/ conference/cesra2016/pages/CESRA2016_prog_abs_book_v1.pdf.

41. Kupriyanova E.G., Kashapova L.K., Xu Z., Reid H.A.S. About origin of quasi-periodicities during the circular ribbon flare // 15th RHESSI Workshop. Graz, July 26–30, 2016: Abstracts. 2016. P. 27. http://static.uni-graz.at/fileadmin/veranstaltungen/rhessi15/ RHESSI-15_Abstracts.pdf.

42. Kupriyanova E. G., Kashapova L.K., Xu Z., Reid H.A.S. MHD oscillations or periodic reconnection? The advantages of multi-wavelength approach // Solar Physics with Radio Observations – Continued Operation of Nobeyama Radiheliograph. Nagoya University, Japan, September 9–10, 2016: Abstracts. 2016. Ст. III-2. http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/ SPRO2016/.

43. Kupriyanova E.G., Chowdhury P. , Kashapova L.K., Van Doorsselaere T., Srivastava A. Quasi-periodicities in thermal emission during the decay phase of the solar flare // CHARM Meeting. Ghent, Belgium, October 3–4, 2016: Abstracts. 2016. http://www.charm. ugent.be/schedule.shtml.

44. Kupriyanova E.G., Kashapova L.K., Xu Z., Reid H.A.S. Diagnostics of the source of quasi-periodocities during the circular ribbon flare // HINODE-10 Science Meeting. Nagoya University, Japan, September 5–8, 2016: Abstracts. 2016. https://hinode.isee.nagoya-u. ac.jp/Hinode10/poster_schedule.html.

45. Kushnarenko G.P. , Yakovleva O.E., Kuznetsova G.M. The effects of geomagnetic disturbances at the ionospheric layer F1 heights during the lower and minimum of solar activity (2003–2009) on st. Irkutsk // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 25. http://ikfia. ysn.ru/rccsw13/.

46. Kuznetsov A.A., Kontar E.P. Observations of a CME-related type IV burst with LOFAR // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. 13-17 June 2016, Universite d'Orleans, France: Abstracts. 2016. http://cesra2016.sciencesconf.org/ conference/cesra2016/pages/CESRA2016_prog_abs_book_v1.pdf.

47. Kuznetsov A.A., Kontar E.P. Imaging radio spectroscopy of a coronal mass ejection with LOFAR // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 23. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

48. Leonovich A.S., Kozlov D.A. Some kinds of MHD oscillations in the geotail // XXXIX Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, February 29 – March 4, 2016: Abstracts. Apatity, 2016. http://pgia.ru:81/seminar/Abstracts.html.

49. Leonovich A.S., Kozlov D.A. Unstable coupled modes in a high-latitude magnetosphere // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 13. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

50. Leonovich A.S., Klimushkin D., Mager P. First in SITU observation of monochromatic standing Alfven waves with spatially dependent polarization // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 13. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

51. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Grechnev V.V., Gubin A.V., Kashapova L.K., Kochanov A.A., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Zhdanov D.A. First observations with the Siberian Radioheliograph // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. Universite d'Orleans, France, June 13–17, 2016: Abstracts. 2016. http://cesra2016.sciencesconf.org/conference/cesra2016/pages/CESRA2016_prog_ abs_book_v1.pdf.

52. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Grechnev V.V., Gubin A.V., Kashapova L.K., Kochanov A.A., Kuznetsov A.A., Meshalkina, N.S., Zhdanov D.A. The first results of the flare observations by the Siberian Multiwave Radioheliograph // 15th RHESSI Workshop. Graz, July 26–30, 2016: Abstracts. 2016. P. 19. http://static.uni-graz.at/fileadmin/ veranstaltungen/rhessi15/RHESSI-15_Abstracts.pdf.

53. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V., Grechnev V.V., Zhdanov D.A., Kochanov A.A., Meshalkina N.S., Kashapova L.K. The Siberian Multiwave Radioheliograph: Results of first observations // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 4. http://ikfia. ysn.ru/rccsw13/.

54. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Grechnev V.V., Gubin A.V., Kashapova L.K., Kochanov A.A., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Zhdanov D.A. The first results of the flare observations by the Siberian Multiwave Radioheliograph // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium “Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future”. Hvar, Croatia, September 26 – 30, 2016: Abstracts. 2016. http://oh.geof.unizg.hr/index.php/en/meetings/ xivth-hac.

55. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V., Grechnev V.V., Zhdanov D.A., Kochanov A.A., Meshalkina N.S., Kashapova L.K. The Siberian Radioheliograph: First results // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 4. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

56. Lesovoi S.V., Kobets V.S., Ivanov E.F., Kochanov A.A. The software correlator for the Siberian Radioheliograph // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. http://radiosun5. asu.cas.cz/.

57. Lysenko A., Altyntsev A.T., Pal'shin V., Meshalkina N.S., Zhdanov D.A., Fleishman G.D. Search and statistical analysis of “cold” solar flares using X-ray and microwave data // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. Universite d'Orleans, France, June 13–17 2016: Abstracts. 2016. http://cesra2016.sciencesconf.org/ conference/cesra2016/pages/CESRA2016_prog_abs_book_v1.pdf.

58. Lysenko A., Aptekar R.L., Fleishman G.D., Kashapova L.K., Kuznetsov A.A., Tsvetkova A.E., Ulanov M.V. KWSFD – the Konus Wind Hard X-ray Solar Flare Database // 15th RHESSI Workshop Graz, July 26–30, 2016: Abstracts. 2016. P. 8. http://static.uni-graz. at/fileadmin/veranstaltungen/rhessi15/RHESSI-15_Abstracts.pdf.

59. Medvedeva I.V., Ratovsky K.G. Seasonal and year-to-year patterns of atmospheric and ionospheric variabilities over Eastern Siberia // First VarSITI General Symposium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Book of Abstracts. 2016. P. 27. http://newserver.stil.bas.bg/ VarSITI2016/.

60. Medvedeva I.V., Ratovsky K.G. Manifestation of the February 2016 sudden stratospheric warming in the neutral atmosphere and ionosphere parameters // First VarSITI General Symposium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Book of Abstracts. 2016. P. 28. http://newserver. stil.bas.bg/VarSITI2016/.

61. Meshalkina N.S., Altyntsev A.T., Meszarosova H., Karlicky M., Lesovoi S.V. Quasi-periodic pulsations with millisecond impulses in a solar flare on 2011 August 4 // RadioSun-5

Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 27. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

62. Meszarosova H., Rybak J., Kashapova L.K., Gomory P., Tokhchukova S.K., Myshyakov I.I. Broadband microwave sub-second pulsations and magnetoacoustic waves in an expanding coronal loop (2011 August 10 flare) // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. Universite d'Orleans, France, June 13–17, 2016: Abstracts. 2016. http://cesra2016.sciencesconf.org/conference/cesra2016/pages/CESRA2016_prog_abs_book_v1.pdf.

63. Mishin V.V., Mishin V.M., Kurikalova M.A., Lunyushkin S.B., Penskikh Yu., Kondrat'ev A. The dynamics of the ionospheric Pedersen currents in an electrical circuit of the disturbed magnetosphere–ionosphere system of the two hemispheres // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 14. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

64. Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Yu.A., Wang C., Han J.P. Saturation of the magnetosphere during superstorms: new results from MIT and the global PPMLP-MHD model // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 14. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

65. Mishin V.V., Mishin, V.M., Kurikalova M.A., Karavaev Yu.A., Lunyushkin S.B., Wang C., Wang J., Zhang J.J. Asymmetric evolution of the magnetospheric substorm expansion phase in the Earth's two hemispheres // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 14. http://ikfia. ysn.ru/rccsw13/.

66. Moiseyev A., Baishev D.G., Mishin V.M., Uozumi T., Yoshikawa A., Du A. Features of formation of small-scale vortex disturbances during the sudden magnetosphere compression // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 15. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

67. Morozova A., Sinegovsky S.I., Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S. The comparison of calculated atmospheric neutrino spectra with measurement data of IceCube and ANTARES experiments // The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics. Moscow, Russia, October 10–14, 2016: Abstracts. 2016. http://indico.cfr. mephi.ru/event/4/Program.

68. Muratova N.O., Muratov A.A. Launching of the new Solar Meter-Wave Spectropolarimeter (SSMD) for 50–500 MHz frequency range in v. Badary (Russia) // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

69. Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V. Testing the technique for absolute total electron content and its gradients estimation // AOGS 13th Annual Meeting. Asia Oceania Geoscience Society. Beijing, China, July 31 – August 5, 2016: Abstracts. 2016. Ст. ST29-D2-PM2-P-024(ST29-A028). http://www.asiaoceania.org/aogs2016/public.asp?page= Program.htm.

70. Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V. Comparison of TayAbsTEC Technique Results with GIM Data // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). Seoul, South Korea, August 21-25, 2016.: Program. 2016. G2-2. http://aprasc2016.org/ Program_at_a_Glance.phP.

71. Myshyakov I. I., Kolobov D.Y., Rudenko G.V., Anfinogentov S., Fleishman G.D., Kochanov A.A. Correction of magnetic field reconstruction with use of magnetic field measurements above the photosphere // XIVth Hvar Astrophysical Colloquium "Solar and Solar-Terrestrial Physics: Now and Future". Hvar, Croatia, September 26–30, 2016: Abstracts. 2016. http://oh.geof.unizg.hr/index.php/en/meetings/xivth-hac.

72. Myshyakov I. I., Kolobov D.Y., Rudenko G.V., Anfinogentov S., Fleishman G.D., Kochanov A.A. Correction of magnetic field reconstruction with use of magnetic field measurements above the photosphere // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 30. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

73. Pascoe D. J., Goddard C.R., Nistico G., Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Coronal loop seismology using damping of standing kink oscillations by mode coupling // IBUKS 2016:

Waves and Oscillations in the Solar Atmosphere. Leuven, Belgium, June 13–16, 2016: Abstracts. 2016. https://wis.kuleuven.be/events/IBUKS2016.

74. Pascoe D. J., Goddard C.R., Nistico G., Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Coronal loop seismology using damping of standing kink oscillations by mode coupling // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 31. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

75. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Meshalkina N.S. Methods of MHD simulation and graphical system of search of solar flare // First VarSITI General Symposium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Book of Abstracts. 2016. P. 59. http://newserver.stil.bas.bg/VarSITI2016/.

76. Polekh N.M., Romanova E.B., Zherebtsov G.A., Zolotukhina N.A., Shi J.K., Wang X., Wang G.J. Ionospheric disturbances in East Asia during magnetic storms in December 2006 and December 2015 // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 31. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

77. Polyakova A.S., Yasyukevich Yu.V., Ratovsky K.G. Features of winter anomaly manifestations in total electron content and peak electron density // AOGS 13th Annual Meeting. Asia Oceania Geoscience Society. Beijing, China, July 31 –August 5, 2016: Abstracts. 2016. Ст. ST41-D2-AM1-311B(L3N)-008(ST41-A023). http://www.asiaoceania.org/aogs2016/public.asp?page=Program.htm.

78. Potapov A.S. Current and high-beta plasma sheets in the CIR shear zones // AGU Chapman Conference on Currents in Geospace and Benyond: Abstracts. Dubrovnik, Croatia, 22–27 May 2016. https:// agu.confex.com/agu/16chapman2/webProgram/Paper94340.html.

79. Reid H.A.S., Kashapova L.K. Solar flare accelerated electrons from high and low radio frequencies // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. Universite d'Orleans, France, June 13–17, 2016: Abstracts. 2016. http://cesra2016. sciences-conf.org/conference/cesra2016/pages/CESRA2016_prog_abs_book_v1.pdf.

80. Ratovsky K.G., Shcherbakov A.A., Alsatkin S.S., Dmitriev A., Suvorova A. Top side electron density from Irkutsk incoherent scatter radar, COSMIC/FORMOSAT-3 and International Reference Ionosphere // First VarSITI General Symposium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Book of Abstracts. 2016. P. 50. http://newserver.stil.bas.bg/VarSITI2016/.

81. Ratovsky K.G., Romanova E.B., Shi J.K., Wang X., Wang G.J., Oinats A.V. Modeling diurnal-seasonal variations of peak height in East Asian sector of equatorial ionosphere // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 28. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

82. Romanova E.B., Zherebtsov G.A., Polekh N.M., Zolotukhina N.A., Shi J.K., Wang X., Wang G. The ionospheric response to the magnetic storms in the East Asian region: Observation and modeling // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 25. http://ikfia.ysn.ru/ rccsw13/.

83. Romanova E.B., Zherebtsov G.A., Polekh N.M., Zolotukhina N.A., Shi J.K., Wang X., Wang G.J. Studying perculiarities of ionospheric response to the 2015 March 17–19 geomagnetic storm in East Asia: Observations and simulation // COSPAR 41st Scientific Assembly 2016. Istanbul, Turkey, July 30 –August 7, 2016: Abstracts. 2016. Ст. C1.3-0024-16. P. 219. https://www.cospar-assembly.org/show_infopage.php?info=52.

84. Rybak J., Meszarosova H., Kashapova L.K., Gomory P. , Tokhchukova S.K., Myshyakov I.I. The 2011 August 10 C2.4 solar flare: Broadband microwave sub-second pulsations in an expanding coronal loop // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 33. http://radiosun5. asu.cas.cz/.

85. Sedykh P.A. Concerning the formation of plasmoids in the geomagnetosphere // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 16. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

86. Semenov A.I., Medvedeva I.V., Perminov V.I., Kochetkova T.A. Variations of the 63 micron atomic oxygen emission in the upper atmosphere // First VarSITI General Sympo-

sium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Book of Abstracts. 2016. P. 27. http://Bulgaria newserver.stil.bas.bg/VarSITI2016/.

87. Shi J.K., Wang G.J., Zherebtsov G.A., Romanova E.B., Ratovsky K.G., Wang X., Wang Z., Polekh N.M., Voeykov S.V. Ionosphere plasma bubbles observed concurrently by multi-instruments in low latitude ionosphere // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 33. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

88. Shpynev B.G., Ratovsky K.G., Zolotukhina N.A., Polekh N.M., Belinskaya A.Yu., Stepanov A., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V., Korenkova N.A., Leschenko V.S. Ionosphere response to major geomagnetic storm in March 2015 on the base of data from Eurasian high–midlatitude ionosphere chain // First VarSITI General Symposium. Bulgaria, June 6–10, 2016: Book of Abstracts. 2016. P. 37. http://newserver.stil.bas.bg/ VarSITI2016/.

89. Sych R.A., Karlicky M., Altyntsev A.T., Dudik J.,Kashapova L.K. Sunspot waves and flare energy release // Dynamic Sun. I. MHD Waves and Confined Transients in the Magnetized Atmosphere. Varansi, India, 22–26 February, 2016: Programme, Abstracts. 2016. P. 134. http://ssg.grouP.shef.ac.uk/Conferences/India_2016/Scientific_Programme. php.

90. Sych R.A., Wang Min, Liu Z. NVST and SDO observations of wave processes in umbral flashes // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 4. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

91. Sych R.A., Wang M., Zhong L. Fine structure of umbra flashes // RadioSun-5 Workshop and Summer School. Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23–27, 2016: Abstracts. 2016. P. 41. http://radiosun5.asu.cas.cz/.

92. Tashchilin A.V., Leonovich L.A. Modeling nightglow in atomic oxygen red and green lines under moderate disturbed geomagnetic conditions at midlatitudes // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 25. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

93. Tinin M.V., Knizhin S. Wide-angle generalization of integral representation as double weighted Fourier transform in the problem of wave reflection from a randomly inhomogeneous ionospheric layer // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). Seoul, South Korea, August 21–25, 2016: Program. 2016. G1-3. http:// aprasc2016.org/Program_at_a_Glance.phP.

94. Vernova E.S., Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. Investigation of cosmic ray cutoff rigidity changes caused by the disturbed geomagnetic field of the storm in March 2012 // EGU General Assembly 2016. Vienna, Austria, 17–22 April, 2016. 2016. art. # . EGU2016-3533. http://egu2016.eu/home.html.

95. Wang X., Demidov M.L. Magnetic offset problem in the measurement of full-disk solar weak field // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 5. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

96. Wang Z., Shi J.K., Wang G.J., Wang X., Zherebtsov G.A., Romanova E.B., Ratovsky K.G. Investigation on the ionospheric parameters at different latitude in Asian Sector during high solar activity // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 24. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

97. Wang X., Shi J.K., Wang G.J., Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Romanova E.B. Cha-racteristics of ionospheric storms in East Asia during 2002–2014 // COSPAR 41st Scientific Assembly 2016. Istanbul, Turkey, July 30 –August 7, 2016: Abstracts. 2016. Ст. C1.1-0011-16. P. 103. https://www.cospar-assembly.org/show_infopage.php?info=52.

98. Yasyukevich Yu.V., Vasilyev R.V., Ratovsky K.G., Vesnin A.M., Globa M.V., Polya-kova A.S. Small-scale ionospheric irregularities during the 2015 June 22 magnetic storm // AOGS 13th Annual Meeting. Asia Oceania Geoscience Society. Beijing, China, July 31 – August 5, 2016: Abstracts. 2016. Ст. ST41-D2-PM2-P-021(ST41-A032). http://www. asiaoceania.org/aogs2016/public.asp?page=Program.htm.

99. Zherebtsov G.A., Potekhin A.P. , Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Podlesny A.V., Berngardt O.I., Tolstikov M.V., Shcherbakov A.A., Alsatkin S.S., Vesnin A.M., Medvedeva I.V., Mikhalev A.V., Zolotukhina N.A., Rakhmatulin R.A., Golovko A.A. Ionospheric, atmospheric, magnetic and solar observations with ISTP instruments during March–April of 2016 // The 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, August 15–19, 2016: Abstracts. Yakutsk, 2016. P. 41. http://ikfia.ysn.ru/rccsw13/.

100. Zhivet'ev I.V., Yasyukevich Yu.V. First results of network technology application for studying the ionosphere // COSPAR 41st Scientific Assembly – 2016. Istanbul, Turkey, July 30 – August 7, 2016: Abstracts. 2016. Ст. C1.4-0006-16. P. 187. https://www.cospar-assembly.org/show_infopage.php?info=52.

101. Абраменко В.И., Соколов Д.Д., Хлыстова А.И. Наблюдательный тест присутствия турбулентного динамо в конвективной зоне Солнца // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/conf2016/.

102. Антошкин Л. В., Ботыгина Н.Н., Больбасова Л.А., Голенева Н.В., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лукин В.П., Трифонов В.Д., Селин А.А., Сазонова П.В., Шиховцев А.Ю. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 9. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

103. Барановский Э.А., Степанян Н.Н., Таращук Ю.Е., Штерцер Н.И., Файнштейн В.Г., Егоров Я.И., Руденко Г.В. Физические условия в волокнах на высотах от фотосферы до короны // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/conf2016/.

104. Барановский Э.А., Степанян Н.Н., Таращук Ю.Е., Штерцер Н.И., Файнштейн В.Г., Егоров Я.И., Руденко Г.В. Особенности физических условий в кольцевых волокнах // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/conf2016/.

105. Ботыгина Н.Н., Копылов Е.А., Лукин В.П., Селин А.А., Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. Сезонная изменчивость качества астрономического видения на Большом солнечном вакуумном телескопе // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 67. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

106. Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В., Сыренова Т.Е., Алешков В.М., Черепанов В.Б. Комплекс оптических инструментов на высокоширотной станции "Исток" ИСЗФ СО РАН // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 88. http://symP.iao.ru/ ru/aoo/22/i1.

107. Демьянов В.В., Кашкина Т.В., Ясюкевич Ю.В. Использование фазовых измерений сигналов ГНСС для детектирования слабых мелкомасштабных ионосферных возмущений // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 154. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

108. Едемский И. К., Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В. Наблюдение эффектов солнечного терминатора в ПЭС в период действия тайфунов // VII Междунар. конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Тезисы докл. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 27.

109. Загайнова Ю.С., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. Вариации магнитных свойств тени солнечных пятен во время эруптивных событий // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/ conf2016/.

110. Ишин А.Б., Воейков С.В. Регистрация ионосферного отклика на включение двигателей космического корабля «Прогресс» по данным ГНСС // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 144. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

111. Клименко М.В., Марков А.В., Абдуллаев А.Р., Ратовский К.Г., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Панченко В.А. Зависимость от солнечной и геомагнитной активности дневных значений N_mF2 в январе 2012–2015 // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, February 29 – March 4, 2016: Abstracts. Apatity, 2016. http://pgia.ru:81/seminar/Abstracts.html.

112. Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г., Захаренкова И.Е., Степанов А.Е., Коренькова Н.А., Подлесный А.В. Поведение субавроральной и высокоширотной F-области ионосферы на фазе восстановления геомагнитных бурь // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, February 29 – March 4, 2016: Abstracts. Apatity, 2016. http://pgia.ru:81/seminar/Abstracts.html.

113. Клименко М.В., Клименко В.В., Ясюкевич Ю.В., Ратовский К.Г., Чирик Н.В., Полякова А.С., Лукьянова Р.Ю. Зимняя аномалия в NmF2 и в полном электронном содержании. 2. Механизмы формирования долготной вариации зимней аномалии // VII Междунар. конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Тезисы докл. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 13.

114. Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Лукин В.П. О некоторых способах описания изменений показателя преломления воздуха с высотой // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 34. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

115. Ковадло П. Г., Шиховцев А.Ю., Лукин В.П. Выбор новых мест для строительства современных наземных телескопов // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 62. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

116. Кушнаренко Г. П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Атмосфера над Норильском в период 2003 - 2013 гг. // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 159. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

117. Ларюнин О.А. О вариациях фазы радиосигнала при распространении в параболическом слое ионосферной плазмы с возмущением // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 35. http://symP. iao.ru/ru/aoo/22/i1.

118. Малащук В.М., Степанян Н.Н., Борисенко А.В., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Егоров Я.И. Вариации характеристик корональных дыр в процессе их эволюции // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/ conf2016/.

119. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Исследование свойств потоков солнечных ускоренных частиц с помощью энергетических спектров // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/ conf2016/.

120. Минасянц Г. С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Физические условия в солнечном ветре и изменения значений Fe/O с энергией ионов в периоды минимума активности

цикла // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/ conf2016/.

121. Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Свойства потоков галактических космических лучей при спокойном солнечном ветре // Международная научная конференция «Математические методы и современные космические технологии», посв. памяти акад. У.М. Султангазина. Алматы, 4–5 октября 2016 г.: Программа и тезисы докл. Алматы, 2016. http://www.spacescience.kz/Programma-konferencii.html.

122. Молодых С.И. Закономерности изменения пространственной структуры отклика ПТВ на вариации геомагнитной активности // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 157. http://symP. iao.ru/ru/aoo/ 22/i1.

123. Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю. В. Сравнение результатов методики TayAbsTEC с данными глобальных ионосферных карт // VII Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Тезисы докл. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 43.

124. Олемской С.В., Латышев С.В. Связь северо-южной ассиметрии с уровнем солнечной активности // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/ conf2016/.

125. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. Исследование механизма солнечной вспышки путем сравнения результатов МГД-моделирования для АО 10365 с рентгеновским наблюдениями // Ежегодная 17-я международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/ conf2016/.

126. Пономарчук С.Н., Ким А.Г., Котович Г.В., Романова Е.Б. Применение модели ионосферы и плазмосферы для моделирования ионограмм наклонного зондирования с учетом перемещающихся ионосферных возмущений // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 34. http://symP. iao.ru/ru/aoo/ 22/i1.

127. Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В., Куркин В.И., Пензин М.С. Автоматическая обработка и интерпретация ионограмм возвратно-наклонного зондирования ионосферы // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 34. http://symP. iao.ru/ru/aoo/ 22/i1.

128. Ратовский К. Г., Щербаков А.А., Алсаткин С.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Сравнительный анализ измерения электронной концентрации во внешней ионосфере // VII Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Тезисы докл. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 44.

129. Семенов А.И., Медведева И.В., Перминов В.И., Хомич В.Ю. Пространственно-временные вариации эмиссии 63 мкм атомарного кислорода // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 172. http://symP. iao.ru/ru/aoo/ 22/i1.

130. Тащилин А.В., Леонович Л.А., Матафонов Г.К. Генерация эмиссий в красной и зеленой линиях атомарного кислорода при наличии высыпаний энергичных электронов в ночной среднеширотной ионосфере // XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 30 июня – 3 июля 2016 г.: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 167. http://symP. iao.ru/ru/aoo/ 22/i1.

131. Файнштейн В.Г., Егоров Я.И., Руденко Г.В. Вариации фотосферного магнитного поля, сопровождающие эруптивное событие 07.06.11 // Ежегодная 17-я международная

солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». Научный, Р. Крым, Россия, 4 – 10 сентября 2016 г.: Тезисы докл. 2016. http://solar.craocrimea.ru/ conf2016/.

132. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Пирог О.М., Телегин В.А., Панченко В.А. Наблюдения дневного полярного каспа на авроральных станциях б. Тикси и Норильск // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, February 29 – March 4, 2016: Abstracts. Apatity, 2016. http://pgia.ru:81/seminar/Abstracts.html.

133. Черток И.М., Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Гречнев В.В. Соотношение между магнитным потоком солнечных эрупций и Ар индексом геомагнитных бурь // XXXIX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, February 29 – March 4, 2016: Abstracts. Apatity, 2016. http://pgia.ru:81/seminar/Abstracts.html.

134. Ясюкевич Ю. В., Васильев Р.В., Веснин А.М., Глоба М.В., Ратовский К.Г. Крупномасштабные и мелкомасштабные неоднородности, генерируемые во время главной фазы магнитной бури 22 июня 2015 г. // VII Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Тезисы докл. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 22.

135. Ясюкевич Ю.В., Ратовский К.Г., Чирик Н.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Полякова А.С., Лукьянова Р.Ю. Зимняя аномалия в N_mF2 и в полном электронном содержании. 1. Морфология явления по данным наблюдений и результатам модельных расчетов // VII Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: Тезисы докл. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 12.

7.7. Монографии

1. Леонович А.С., Мазур В.А. Линейная теория МГД-колебаний магнитосферы: научное издание. М.: Физматлит, 2016. 480 с.

2. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптические свойства когерентной турбулентности в горном пограничном слое. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 154 с. ISBN 978-5-7692-1514-8.

3. Смольков Г.Я. Роль и вклад А.А. Пистолькорса в разработку и сооружение ССРТ // А.А. Пистолькорс. М.: ООО концерн "ВЕГА", 2016. С. 132–137.

4. Leonovich A.S., Mazur V.A., Kozlov D.A. MHD Oscillations in the Earth's Magnetotail: Theoretical Studies: book chapter // Low Frequency Waves in Space Plasmas. John Wiley and Sons, 2016. P. 161–179. (Geophysical Monographs Series. Vol. 216).

5. Sedykh P.A. Bow shock: Power Aspects: book chapter // Horizons in World Physics. New York: Nova Science Publ., 2015. Vol. 285. P. 23–73.

6. Sych R.A. MHD wave in sunspots: book chapter // Low Frequency Waves in Space Plasmas: John Wiley and Sons, 2016. P. 467–487. (Geophysical Monographs Series. Vol. 216).

7. Yeoman T.K., James M., Klimushkin D., Mager P. Energetic particle - driven ULF waves in the ionosphere: book chapter // Low Frequency Waves in Space Plasmas: John Wiley and Sons, 2016. P. 1–14. (Geophysical Monographs Series. Vol. 216).

7.8. Электронные публикации

1. Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Meszarosova H., Karlicky M., Pal'shin V., Lesovoi S.V. Sources of Quasi-periodic pusses in the 18 August 2012 Flare // arXiv.org. 2016. # arXiv:1601.02332v1. http://arxiv.org/pdf/1601.02332.pdf.

2. Anfinogentov S., Nakariakov V.M. Motion magnification in coronal seismology // arXiv.org. 2016. # 1611.01790v1. https://arxiv.org/pdf/1611.01790v1.pdf.

3. Berngardt O.I., Perevalova N.P., Podlesny A.V., Kurkin V.I., Zherebtsov G.A. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016 // arXiv.org. 2016. #1609.08366. https://arxiv.org/pdf/1609.08366.pdf.

4. Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN Scalar radar equations //

arXiv.org. 2016. #1605.01906. https://arxiv.org/pdf/1605.01906.pdf.

5. Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. Influence of the magnetic field on oscillation spectra in solar faculae // arXiv.org. 2016. # 1607.01877v2. https://arxiv.org/pdf/1607.01877.pdf.

6. Fainshtein V.G., Egorov Ya.I., Rudenko G.V., Anfinogentov S. On the variations in the photospheric magnetic field in the vicinity of a solar flare as deduced from SDO/HMI measurements of the magnetic field vector // arXiv.org. 2016. # 1601.02310v1. http://arxiv.org/pdf/1601.02310.pdf.

7. Fleishman G.D., Pal'shin V., Meshalkina N.S., Lysenko A., Kashapova L.K., Altyntsev A.T. A Cold Flare with Delayed Heating // arXiv.org. 2016. # 1603.07273v1. http://arxiv.org/pdf/1603.07273.pdf.

8. Grechnev V.V., Uralov A.M., Kochanov A.A., Kuzmenko I.V., Prosovetsky D.V., Egorov Ya.I., Fainshtein V.G., Kashapova L.K. A tiny eruptive filaments as a flux — rope progenitor and driver of a large — scale CME and wave // arXiv.org. 2016. # 1604.00800v1. DOI: https://arxiv.org/pdf/1604.00800.pdf.

9. Grechnev V.V., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar flare event responsible for GLE63. 1. Observations of a major long — duration flare with the Siberian Solar Radio Telescope // arXiv.org. 2016. # 1609.02256. https://arxiv.org/pdf/1609.02256.pdf.

10. Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V., Klein K.-L., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar flare event responsible for GLE63. 3. SME, shock wave, and energetic particle // arXiv.org. 2016. # 1612.04092v1. https://arxiv.org/pdf/1612.04092.pdf.

11. Kitchatinov L.L. Rotational shear near the solar surface as a probe for subphotospheric magnetic fields // arXiv.org. 2016. # 1601.04855v1. http://arxiv.org/pdf/1601.04855.pdf.

12. Kitchatinov L.L., Olemskoy S.V. Dynamo model for grand maxima of solar activity: can superflares occur on the Sun? // arXiv.org. 2016. # 1602.08840v1. http://arxiv.org/pdf/1602.08840.pdf.

13. Kitchatinov L.L. Meridional circulation in the Sun and stars // arXiv.org. 2016. # 1603.07852v2. http://arxiv.org/pdf/1603.07852.pdf.

14. Kitchatinov L.L., Nepomnyashchikh A.A. Diamagnetic pumping in a rotating convection zone // arXiv.org. 2016. # 1604.07942v2. https://arxiv.org/pdf/1604.07942.pdf.

15. Kitchatinov L.L., Nepomnyashchikh A.A. A joined model for solar dynamo and differential rotation // arXiv.org. 2016. # 1612.07503v1. https://arxiv.org/pdf/1612.07503.pdf.

16. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Cherniak Y.V., Galkin I.A. Longitudinal Variation in the Ionosphere-Plasmasphere System at the Minimum of Solar and Geomagnetic Activity: Investigation of Temporal and Latitudinal Dependences // Radio Science. DOI: 10.1002/2015RS005900

17. Kolobov D.Y., Chelpanov A.A., Kobanov N.I. Peculiarity of the oscillation stratification in sunspot penumbra // arXiv.org. 2016. # 1607.06175v1. https://arxiv.org/pdf/1607.06175.pdf.

18. Kuznetsov A.A., Keppens R., Xia C. Synthetic radio views of simulated solar flux ropes // arXiv.org. 2016. # 1601.02370v1. http://arxiv.org/pdf/1601.02370.pdf.

19. Mazaeva E., Pozanenko A., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 20018. GRB 161007A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

20. Mazaeva E., Pozanenko A., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I. MASTER optical transient: Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19947. GRB 160925A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

21. Mazaeva E., Pozanenko A., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19919. GRB 160910A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

22. Mazaeva E., Pozanenko A., Klunko E., Volnova A., Minaev P., Korobtsev I. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19670. GRB 160629A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/ gcn3_archive.html

23. Mazaeva E., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I., Pozanenko A. Mondy optical observations, photometry of NOT sources // GCN CIRCULAR. 2016. # 19490. GRB 160601A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

24. Mazaeva E., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I., Pozanenko A. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19483. GRB 160601A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

25. Metodieva Y.T., Kuznetsov A.A., Antonova A.E., Doyle J.G., Ramsay G., Wu K. Modelling the environment around five ultracool dwarfs via the radio domain // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.2016. DOI: 10.1093/mnras/stw2597.

26. Mazaeva E., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I., Pozanenko A. Mondy optical upper limit // GCN CIRCULAR. 2016. # 19470. GRB 160525B. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

27. Mazaeva E., Volnova A., Klunko E., Korobtsev I., Pozanenko A. Mondy optical upper limit // GCN CIRCULAR. 2016. # 19241. GRB 160327A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

28. Mazaeva E., Volnova A., Klunko E., Korobtsev I., Pozanenko A. Mondy optical upper limit // GCN CIRCULAR. 2016. # 19201. GRB 160313A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

29. Mazaeva E., Volnova A., Klunko E., Korobtsev I., Pozanenko A. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19195. GRB 160314A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

30. Mazaeva E., Klunko E., Volnova A., Korobtsev I., Pozanenko A. Mondy optcial observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19120. GRB 160228A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

31. Pipin V.V. Magnetic helicity in non-axisymmetric mean-field solar dynamo // arXiv.org. 2016. # 1601.05184v1. http://arxiv.org/pdf/1601.05184.pdf.

32. Pipin V.V., Kosovichev A.G. Angular momentum fluxes caused by JI- effect and meridional circulation structure of the Sun // arXiv.org. 2016. # 1601.05178v1. http://arxiv.org/pdf/1601.05178.pdf.

33. Pipin V.V., Kosovichev A.G. Dependence of stellar magnetic activity cycles on rotational period in nonlinear solar - type dynamo // arXiv.org. 2016. # 1602.07815v1. http://arxiv.org/pdf/1602.07815.pdf.

34. Pipin V.V. Nonlinear regimes in mean-field full-sphere dynamo // arXiv.org. 2016. # arXiv:1609.0906v2. https://arxiv.org/pdf/1609.00906.pdf.

35. Pozanenko A., E. Mazaeva, P. Minaev, E. Klunko , A. Volnova, I. Korobtsev. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19561. GRB 160623A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/ gcn3_archive.html

36. Ratovsky K.G., A.V. Dmitriev, A.V. Suvorova , A.A. Shcherbakova, S.S. Alsatkin, A.V. Oinats Comparative study of COSMIC/FORMOSAT-3, Irkutsk incoherent scatter radar, Irkutsk Digisonde and IRI model electron density vertical profiles // Adv. Space Res. http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.026

37. Sharykin I.N., Kuznetsov A.A. Modeling of nonthermal microwave emission from twisted magnetic loops // arXiv.org. 2016. # 1604.05618v1. http://arxiv.org/pdf/1604.05618.pdf.

38. Yokoi N., Hamba F., Schmitt D., Pipin V.V. A new simple dynamo model for stellar activity cycle // arXiv.org. 2016. # 1601.06348v1. http://arxiv.org/pdf/1601.06348.pdf.

39. Wang G.J., Shi J.K., Wang Z., Wang X., Romanova E., Ratovsky K., Polekh N.M. Solar cycle variation of ionospheric parameters over the low latitude station Hainan, China, during 2002–2012 and its comparison with IRI-2012 model // Adv. Space Res. http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.013

40. Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V., Lukianova R.Yu. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // Advances in Space Research.

http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.008

41. Volnova A., Pozanenko A., Klunko E., Mazaeva E., Korobtsev I. Mondy afterglow confirmation // GCN CIRCULAR. 2016. # 19936. GRB 160917A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

42. Volnova A., Pozanenko A., Klunko E., Mazaeva E., Korobtsev I. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19929. GRB 160917A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

43. Volnova A., Pozanenko A., Klunko E., Mazaeva E., Korobtsev I. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 19920. GRB 160912A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

44. Volnova A., Pozanenko A., Klunko E., Mazaeva E., Korobtsev I. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 18991. GRB 160131A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

45. Volnova A., Pozanenko A., Klunko E., Mazaeva E., Korobtsev I. Mondy optical observations // GCN CIRCULAR. 2016. # 18971. GRB 160131A. http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html

7.9. Патенты

Перевалов А.А., Перевалова Н.П. Управление и сбор данных с двухчастотного ГНСС-приемника Javad Delta через интерфейсы USB и RS-232 в интерактивном и пакетном режимах в операционной системе Linux: Свидетельство о гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2016613942; дата — 12.04.2016; Заявл. 20.02.2016; Опубл. 20.05.2016. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet.

7.10. Статьи, сданные в печать в российские издания

1. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Мартынова Ю.В. Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть II: Долговременные вариации и связь с климатической изменчивостью в Азии // Метеорология и гидрология.
2. Безлер И.В., Ишин А.Б., Конецкая Е.В., Тинин М.В. Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС // Геомагнетизм и аэрономия.
3. Боровик А.В., А.А. Жданов. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности I. Распределения вспышек по площади, яркости и баллам // Солнечно-земная физика.
4. Гречнев В.В., Киселев В.И., Мешалкина Н.С., Черток И.М. О корреляции околоземных протонных возрастаний > 100 МэВ с микроволновыми параметрами солнечных эруптивных событий // Солнечно-земная физика.
5. Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П. Реакция ионосферы на запуск ракеты с космодрома Восточный // Доклады Академии наук. Направлена в печать 1 июня 2016 г.
6. Загайнова Ю.С., Файнштейн В.Г., Обридко В.Н., Руденко Г.В. Вариации магнитного поля в тени одиночных и магнитно-связанных пятен при их прохождении по диску Солнца // Геомагнетизм и аэрономия.
7. Коробцев И.В., Горяшин В.Е., Еселевич М.В. Результаты сопровождения космического аппарата в окрестности точки либрации L2 системы Солнце–Земля // Астрономический журнал. 2017. Т. 94, № 1.
8. Ларюнин О.А. Отображение признаков перемещающихся ионосферных возмущений на ионограммах вертикального зондирования // Известия ВУЗов. Физика (в печати).
9. Медведева И.В., Ратовский К.Г. Сравнительный анализ атмосферной и ионосферной изменчивости по измерениям температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации N_mF2 // Геомагнетизм и аэрономия. 2017
10. Михалев А.В. Излучение верхней атмосферы Земли в эмиссии [OI] 557.7 нм в

периоды сейсмических событий в Байкальской рифтовой зоне // Оптика атмосферы и океана. 2016 (статья прошла рецензирование и принята к печати).

11. Ойнац А.В., Васильев Р.В. Способ автоматической идентификации сигналов, приходящих с заднего сектора обзора когерентного КВ-радара // Известия ВУЗов. Физика (в печати).

12. Файнштейн В.Г., Егоров Я.И., Руденко Г.В., Анфиногентов С.А. Вариации магнитного поля, сопровождающие возникновение КВМ, связанного с эрупцией волокна // Геомагнетизм и аэрономия.

13. Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Сазонов С.Ю., Амвросов А.Л., Еселевич М.В. Оптическая спектроскопия кандидатов в квазары на $3<z<5.5$ из рентгеновского обзора обсерватории XMM-Ньютон. Далекий рентгеновский квазар на $z=5.08$ // Письма в Астрономический журнал. 2017. Т. 43, № 3.

14. Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Полякова А.С., Воейков С.В., Захаров В.И., Перевалова Н.П., Титков Н.Н. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Принята в печать.

7.11. Статьи, сданные в печать в зарубежные издания

1. Berngardt O.I., Perevalova N.P., Podlesnyi A.V., Kurkin V.I., Zherebtsov G.A. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk Chirp Ionosonde data in 2011–2016 // J. Geophys. Res. Submitted 27.09.2016.

2. Bezler I.V., Ishin A.B., Konetskaya E.V., Tinin M.V. The association of anisotropy of GPS phase slips with the field-aligned ionospheric irregularities // Intern. J. Navigation and Observation. https://www.hindawi.com/journals/ijno/

3. Chelpanov A. A., Kobanov N. I., Chupin S.A. Search for the observational manifestations of torsional Alfvén waves in solar faculae // Cent. Eur. Astrophys. Bull.

4. Demidov M.L., Kiselev A.V. / On the time variations of magnetic strength ratios in different combinations of spectral lines // ASP Conf. Ser. Proc. Solar Polarization Workshop – 8, Italy.

5. Demidov M.L., Wang X.F., Hou J.F., Wang D.G., Kiselev A.V., Kuzanyan K.M. On the cross-calibration of the Huairou Solar Observation Station full disk longitudinal magnetograms with data sets from STOP/SSO and SDO/HMI // ASP Conf. Ser. Proc. Solar Polarization Workshop – 8, Italy.

6. Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V.I., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar eruptive event responsible for GLE63. II. Multi-loop structure of microwave sources in a major long-duration flare // Solar Phys. 2016.

7. Khlystova A., Toriumi S. Photospheric velocity structures during the emergence of small active regions on the Sun // Astrophys. J.

8. Mishin V.M., Lunyushkin S.B., Mishin V.V., Wang J.Y., Moiseev A.V. 27 August 2001 substorm: Pre-onset phenomena, two main onsets, field-aligned current systems, and plasma flow channels in the ionosphere and in the magnetosphere // J. Geophys. Res.

9. Morozova A., Sinegovsky S.I., Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S. The comparison of calculated atmospheric neutrino spectra with measurement data of IceCube and ANTARES experiments // J. of Physics: Conf. Ser.

10. Polyachenko E.V., Shukhman I.G. Instabiliy of stationary spherical models with orbits arbitrarily close to radial // Baltic Astronomy. 2016 (in print).

11. Ratovsky K.G., Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Shcherbakov A.A., Alsatkin S.S., Oinats A.V. Comparative study of COSMIC/FORMOSAT-3, Irkutsk incoherent Scatter Radar, Irkutsk digisonde and IRI model electron density vertical profiles // Adv. Space Res. 2016/2017.

12. Smolkov G.Ya., Barkin Yu.V. External factors of solar-terrestrial relations // Astron. Astrophys. Trans. (in print).

13. Vasilyev R., Globa M., Kushnarev D., Medvedev A., Ratovsky K. Spectral characteristics of ionospheric scintillations of UHF radio signal near magnetic zenith // JASTP.

14. Volnova A.A., Pruzhinskaya M.V., Pozanenko A.S., Blinnikov S.I., Minaev P.Yu., Burkhonov O., Chernenko A.M., Egamberdiev Sh.A., Inasaridze R., Jelinek M., Khorunzhev G., Klunko E., Krugly Yu., Mazaeva E., Rumyantsev V.V., Volvach A. Multicolour modelling of SN 2013dx associated with GRB 130702A // Mon. Not. R. Astron. Soc.

15. Yasyukevich Yu.V., Vasilyev R.V., Vesnin A.M., Globa M.V., Ratovsky K.G. Small-scale ionospheric irregularities at mid-latitude during the 2015 June 22 magnetic storm // GRL (in print).

16. Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V., Lukianova R.Yu. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // Adv. Space Res. 2016/2017.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Структура Института……..……..	2
2. Исследования в области физики Солнца, радиоастрофизики и космических лучей ……	5
2.1. Магнитные поля Солнца и природа солнечной активности…….	6
2.1.1. Измерения крупномасштабных магнитных полей Солнца……	6
2.1.2. Обращение полярностей на полюсах Солнца и формирование полярных корональных дыр в текущем цикле……	8
2.1.3. Закономерности формирования моат-ячеек в процессе развития солнечных пятен …….	10
2.1.4. Наблюдательные свидетельства связи всплытия магнитных полей, токов и солнечных вспышек 10 мая 2012 г…….	11
2.1.5. Развитие моделей динамо солнечной активности……..	12
2.2. Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере…….....	14
2.2.1. Получение новых знаний о характеристиках эруптивных процессов в атмосфере Солнца……	14
2.2.1.1. Мощные солнечные вспышки: условия инициации и ускорения частиц….....	14
2.2.2. Получение новых знаний о природе колебательных процессов в короне ……..	15
2.2.2.1. Разработка методов поиска и диагностики колебаний и волн в атмосфере активных областей ……..	15
2.2.2.2. Высотное распределение частоты отсечки ……..	16
2.2.2.3. Динамика волновой активности и ее связь со вспышками ……	18
2.2.2.4. Связь между волновой активностью и вспышками ……..……..	21
2.2.2.5. Модельные расчеты колебаний в пятнах …….	21
2.2.3. Исследования волновых процессов в нижней солнечной атмосфере по вариациям допплеровской скорости, ширины профилей спектральных линий и интенсивности в видимом и ИК диапазонах, оценки современных полуэмпирических моделей солнечной атмосферы на базе расчета функций отклика сильных спектральных линий на возмущения физических условий …….	22
2.2.3.1. Периодические вариации профилей спектральных линий в корональных дырах …….	22
2.2.3.2. Исследование формы контуров линии K Ca II и динамических процессов в солнечной хромосфере в основании корональной дыры……	24
2.2.3.3. Зависимость характеристик колебаний в факелах от напряженности магнитного поля ……..……	27
2.2.3.4. Исследование движений и колебаний в солнечных волокнах перед их эруцией ……...	27
2.2.3.5. Исследование необычного события в тени пятна, наблюдавшегося 12.07.2014. Морфологическое описание пространственного строения тени исследуемого пятна ……...	28

2.2.3.6. Тестирование пакета программ для вычисления функций отклика интенсивностей линий CaII на возмущения температуры с использованием современных моделей солнечной хромосферы …….....	28
2.2.4. Мониторинг Солнца в оптическом диапазоне, расширение баз данных…….	29
2.3. Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца……...	30
2.3.1. Физические процессы в солнечных вспышках и солнечных активных областях …….	30
2.3.1.1.Оптические исследование процессов, происходящих в солнечных вспышках ……..	30
2.3.1.2. Ударная поляризация в солнечных вспышках……...	31
2.3.1.3. Исследование структуры солнечных петель ……..	33
2.3.1.4. Многопетельная структура микроволновых источников в мощной продолжительной вспышке ……..……...	33
2.3.2. Экспериментальное исследование корональных выбросов массы …….....	36
2.3.2.1. Впервые выявлен сценарий формирования солнечного коронального выброса и ударной волны ……..……...	36
2.3.2.2. Исследована мощная геоэффективная солнечная вспышка по наблюдениям Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ) ……...	37
2.3.2.3. Анализ предэруптивной стадии и экспериментальное обоснование образования ударного разрыва внутри ускоряющегося коронального выброса ……	38
2.3.2.4. Изучение деталей генерации КВМ различных типов и связанных в ними ударных волн, свойств активных областей, в которых возникают КВМ ……..	40
2.3.3. Исследование спокойных солнечных процессов, оказывающих воздействие на магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли, оказывающие влияние на состояние космической погоды …….	48
2.3.3.1. Идентификация источников солнечного ветра …….	48
2.3.4. Моделирование солнечных процессов и явлений ……	48
2.3.4.1. Взаимодействие колебаний с нулевой точкой магнитного поля ……	48
2.3.4.2. Численное моделирование крупномасштабных корональных волн ……	49
2.3.5. Прогнозирование геоэффективных процессов в солнечной атмосфере ……	49
2.3.5.1. Методика ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций по изображениям в крайнем ультрафиолете и магнитограммам SOHO адаптирована к данным SDO...	49
2.3.5.2. Статистический анализ соотношений между параметрами околоземных протонных возрастаний > 100 МэВ и разными параметрами солнечной эруптивной активности ……	49
2.3.6. Развитие методик исследования солнечных явлений и процессов ……	50
2.3.6.1. Наблюдения хромосферы в линиях H-альфа и K CaII на хромосферных телескопах БАО ИСЗФ ……...	50
2.4. Радиоастрономические исследования динамических процессов в солнечной короне …	54
2.4.1. Исследование солнечной вспышки 10 марта 2002 г. ……	54
2.4.2. Исследование квазипериодических пульсаций в солнечной вспышке 18 августа 2012 г.	55
2.4.3. Моделирование радиоизлучения магнитных жгутов в солнечных активных областях	56
2.4.4. Исследование микроволновых всплесков III типа …….	58

2.5. Развитие оптических и радиофизических методов в области астероидно-кометной опасности, техногенного засорения и экологии космического пространства ……..	59
2.5.1. Наблюдения космических объектов в точке либрации L2 системы Солнце-Земля. Исследование возможности построения орбиты для объектов вблизи точки Лагранжа L2 на основе измерений оптическими телескопами Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН …	59
2.5.2. Исследование вопросов применения существующих фотометрических звездных каталогов для обработки фотометрических измерений космических объектов ……..	61
2.5.3. Совершенствование методов обработки данных оптических измерений при координированных наблюдениях КО радио и оптическими средствами ……..	63
2.5.4. Позиционные и фотометрические измерения астероидов, в том числе сближающихся с Землей ……	65
2.5.5. Отладка элементов активной оптической системы телескопа АЗТ-33ВМ ……..	67
2.6. Фундаментальные основы мониторинга и контроля околоземного космического пространства в оптическом диапазоне ……..	70
2.6.1. Широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ ……	70
2.6.2. Порядок проведения наблюдений ……...	71
2.6.3. Результаты обзорных наблюдений …….....	73
2.7. Диагностика межпланетной среды по данным наблюдений космических лучей …….	74
2.7.1. Жесткостной спектр и анизотропия галактических КЛ в период GLE в январе 2014 г. ...	74
2.7.2. Анализ форбуш-эффекта в июне 2015 г. методом спектрографической глобальной съемки……	77
2.7.3. Изучение последствий временного изменения тока эруптивных жгутов в крупных вспышках на Солнце ……...	80
2.7.4. Изучение характеристик спектров энергичных частиц от солнечных эруптивных событий (вспышек и КВМ) и проявлений FIP эффекта в составе СКЛ по данным с КА ACE и Wind…….	81
2.7.5. Наблюдение космических лучей на станциях ИСЗФ СО РАН ……	82
3. Исследования в области физики околоземного космического пространства ……..	84
3.1. Развитие новых методов экспериментальных радиофизических исследований верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства …….	86
3.1.1. Экспериментальное исследование проявления внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере Земли ……	86
3.1.2. Исследование суточно-сезонных зависимостей поведения электронной концентрации по данным Иркутского радара НР …….	89
3.1.3. Исследование влияния геомагнитного поля на характеристики ионосферных мерцаний по данным Иркутского радара НР …….	91
3.1.4. Модель кросскорреляционных характеристик при наблюдении дискретных радиоисточников на Иркутском радаре НР …….....	92
3.1.5. Определение параметров распределения яркости по диску Солнца в метровом диапазоне длин волн, при помощи Иркутского радара НР …….	94

3.1.6. Оценка потенциала перспективного радара НР-МСТ ……..	95
3.1.7. Работы по обеспечению совместимости Иркутского радара НР с новой радиолокационной станцией «Воронеж М» ……	97
3.1.8. Исследование динамики среднеширотной ионосферы с помощью Иркутского радара НР ……...	98
3.2. Распространение волн различных диапазонов в ионосфере Земли …….	100
3.2.1. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн ……..	100
3.2.2. Разработка метода расчета характеристик КВ сигналов, рассеянных на локальных неоднородностях ионосферной плазмы и земной поверхностью, на основе метода нормальных волн ……	103
3.2.3. Получение радиолокационного уравнения для когерентного радара декаметрового диапазона ……..	107
3.3. Исследование динамических процессов в магнитосфере и высокоширотной ионосфере Земли методом обратного рассеяния радиоволн коротковолнового диапазона ……..	110
3.3.1. Разработаны программные комплексы и методы анализа данных радаров SuperDARN, учитывающие особенности распространения сигнала для калибровки радара и для анализа характеристик фоновой ионосферы …….	110
3.3.2. Введен непрерывный 30-секундный индекс квазивертикальных вариаций ТЕС (W_{tec}) …….	112
3.3.3. Создана реализация алгоритма расчета зон рассеяния сигнала радаров SuperDARN на ориентированных неоднородностях ионосферы ……..	113
3.4. Создание сегмента мониторинга уровня ионосферных помех в Азиатском регионе России, связанных с естественными неоднородностями полярной ионосферы …	113
3.4.1. Радары ИСЗФ СО РАН и геометрия эксперимента …….	113
3.4.2. Совместные наблюдения радиоэха в КВ- и УКВ-диапазонах 8 июня 2015 г. …	116
3.4.3. Калибровка радаров КВ и УКВ в эксперименте ……...	120
3.4.3.1. Источники ошибок географической привязки данных радаров ……...	120
3.4.3.2. Географическая калибровка данных РНР …….	120
3.4.3.3. Географическая калибровка данных радара КВ ……...	124
3.4.4. Интерпретация радиоавроры 11:00–3:00UT …….	128
3.4.4.1. Динамика рассеивающей области по данным радара РНР …….	128
3.4.4.2. Динамика рассеивающих областей по данным радара КВ …….	131
3.4.5. Обсуждение полученных результатов ……...	134
3.5. Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характерстик атмосферы, Мирового океана и климат	136

3.5.1. Выявление основных физических процессов и механизмов, наряду с солнечной активностью, ответственных за изменения климата ……	136
3.5.2. Исследование пространственно-временных изменений термодинамических характеристик Мирового океана ……	140
3.5.3. Анализ влияния различных факторов на наблюдаемые изменения пространственной структуры отклика тропосферы на вариации геомагнитной активности ……	141
3.5.4. Статистический анализ динамики воздушных масс внетропических циклонов при разных геомагнитных услових……	142
3.5.5. Исследование связи внезапных стратосферных потеплений (ВСП) с возмущениями, приходящими из тропиков, эпизодами Madden-Julian oscillation (MJO), планетарными волнами. Изучение природы крутильных колебаний и их связи с ВСП и MJO …….	143
3.5.6. Исследование особенностей вариаций мезосферной эмиссии атомарного кислорода [OI] 557.7 нм в 24-м солнечном цикле …….	145
3.5.7. Анализ изменчивости ионосферы в спокойных геомагнитных условиях по данным наклонного зондирования …….	146
3.5.8. Оценка вкладов солнечной и геомагнитной активности в регулярные вариации ионосферных параметров ……	147
3.5.9. Исследование процессов в системе термосфера-ионосфера во время геомагнитных возмущений и в спокойных условиях для длительного периода 2003–2013 гг. на основе данных измерений дигизондов на станциях Иркутск и Норильск …….....	148
3.5.10. Исследование взаимосвязи различных регионов ионосферы ……	150
3.5.11. Исследование интенсивности вариаций полного электронного содержания в различных географических регионах ……...	151
3.5.11.1. Особенности суточных и долготных вариаций NmF2 и ПЭС в условиях глубокого минимума солнечной активности ……...	151
3.5.11.2. Использование индекса усредненной интенсивности вариаций ПЭС W_{tec} ……..	153
3.5.11.3. Оценка возможности использования геостационарных спутников для исследования ионосферы…….	153
3.6. Исследование системы литосфера–атмосфера–ионосфера в экстремальных условиях	155
3.6.1. Проведение координированных измерений параметров атмосферы, ионосферы, геомагнитного поля в Байкальском регионе и пополнение банков геофизических данных	155
3.6.2. Реакция ионосферы на первый на запуск ракеты с космодрома Восточный ……	156
3.6.3. Исследование динамического и высотного состава неоднородностей верхней атмосферы, генерируемых при землетрясениях поверхностными сейсмическими волнами по большому объему экспериментальных данных ……	158
3.6.4. Проявление сейсмических событий в собственном излучении верхней атмосферы Земли	160
3.7. Изучение динамических процессов в системе нейтральная атмосфера – ионосфера – магнитосфера Земли ……	162
3.7.1. Исследование процессов динамического воздействия тропосферы, стратосферы и мезосферы на ионосферу земли в условиях гелиогеофизических возмущений различной природы …….	162

3.7.1.1. Проявление метеорологических эффектов в вариациях параметров средней атмосферы и ионосферы ……..	162
3.7.2. Мониторинг и диагностика ионосферы и нейтральной атмосферы Азиатского региона России с использованием наземных и спутниковых методов зондирования. Проведение регулярных измерений, организация банков данных GPS/ГЛОНАСС, спутниковых, оптических измерений в Азиатском регионе России ……..	164
3.7.2.1. Оптические измерения собственного излучения верхней атмосферы Земли …….	164
3.7.2.2. Спутниковая информации о параметрах атмосферы …….	167
3.7.2.3. Измерения на сети приемников GPS/ГЛОНАСС ……...	167
3.7.2.4. Оптическое проявление работы бортовых двигателей низкоорбитальных космических аппаратов …….	168
3.7.3. Исследование физических процессов динамики ионосферы в периоды геомагнитных возмущений на основе данных наблюдений и теоретического моделирования …….....	169
3.7.3.1. Реакция ионосферы и термосферы на магнитную бурю 17 марта 2015 г…….	169
3.7.4. Разработка теоретических и эмпирических глобальных и региональных моделей нейтральной атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли…….	170
3.7.4.1. Генерация ночных среднеширотных свечений в красной и зеленой линиях атомарного кислорода при наличии электронных высыпаний……	170
3.7.4.2. Насыщение магнитосферы и полярной шапки во время супербурь…….	171
3.7.4.3. Асимметрия продольных токов в ионосферах двух полушарий……..	171
3.7.4.4. Свойства дневных длиннопериодных пульсаций во время начала магнитной бури	172
3.8. Изучение волновых процессов и возмущений в околоземном космическом пространстве ……...	173
3.8.1. Механизмы генерации азимутально-крупномасштабных волн типа Pc5……..	173
3.8.2. Статистический анализ событий Pc5 пульсаций по данным Екатеринбургского когерентного декаметрового радара…….....	174
3.8.3. Исследование магнитосферных и ионосферных резонаторов для волн типа Pc1 ……..	175
3.8.4. Структура акустических волн в атмосфере……	177
3.8.5. Исследование пространственно-временной структуры возмущений в сдвиговых течениях…….	178
3.9. Исследование и мониторинг магнитосферно-ионосферных возмущений с использованием пространственно-разнесенных геофизических комплексов……	180
3.9.1. Круглогодичный, круглосуточный мониторинг……	180
3.9.2. Мониторинг параметров геомагнитного поля Земли……	181
3.9.3. Ионосферные наблюдения……...	182
3.9.4. Мониторинг параметров атмосферного электричества……	182
3.9.5. Непрерывный круглогодичный мониторинг вариаций полного электронного содержания по данным сети разнесенных приемников сигналов ГНСС-систем ……..	183

3.9.6. Мониторинг параметров инфразвука……..	183
3.9.7. Мониторинг светимости ночного неба в средних широтах……..	183
3.9.8. Модернизация и профилактика существующих геофизических комплексов…….	184
3.9.8.1. Многокомпонентный геофизический комплекс Норильской КМИС……..	184
3.9.8.2. Модернизация компонент геофизического комплекса на Норильской КМИС ……..	186
3.9.9. Выносная точка «Исток» Норильской КМИС……	188
3.9.9.1. Оптическое оборудование…….	190
3.9.9.2. Подготовительные работы для установки магнитовариационной станции (МВС) ...	191
3.9.9.3. GPS-наблюдения……	192
3.9.10. Создание специализированного сервера для организации базы экспериментальных данных, получаемых с комплекса геофизических приборов в средних и авроральных широтах……..	192
3.9.10.1. Разработка комплексного программного обеспечения для создания специализированной базы данных……	192
3.9.10.2. Сбор, обработка и хранение данных ГНСС измерений на сервере ИСЗФ СО РАН	193
3.9.11. Результаты исследований магнитосферно-ионосферных взаимодействий по материалам экспериментальных наблюдений на обсерваториях Института …….	194
3.9.11.1. Ионосферный отклик на магнитные бури ……	194
3.9.11.2. Разработка программного обеспечения комплекса радиотомографического исследования ионосферы по данным приема сигналов низкоорбитальных спутниковых систем, развертываемого в ИСЗФ …….	195
3.9.11.3. Организация интерферометрических исследований ионосферы на базе приема сигналов геостационарных систем станциями сети спутниковых наблюдений ионосферы ИСЗФ. Сопоставление результатов наблюдений данного типа с исследованиями вариаций ПЭС, определяемыми по данным ГНСС систем ……..	195
3.9.11.4. Исследование зависимости амплитуды вариаций ПЭС от угла места на спутники GPS/ГЛОНАСС ……	196
3.9.11.5. Регистрация ионосферного отклика на включение двигателей космического корабля «Прогресс» по данным ГНСС ……..	197
3.9.11.6. Формирование вторичного источника низкочастотных инфразвуковых колебаний верхней атмосфере средних широт ……	202
3.9.11.7. Исследование электромагнитного отклика в магнитном поле Земли на работу двигателей КА (эксперимент «Радар-Прогресс») …….	205
4. Развитие методов и аппаратуры исследований в области астрофизики и геофизики …….....	208
4.1. Методы и инструменты астрофизического эксперимента ……..	209
4.1.1. Разработка и создание перспективных проблемно-ориентированных телескопов и приборов ……	209
4.1.1.1. Модернизация хромосферного телескопа. Новый свет: сборка и юстировка оптики, проведение наблюдений …….	209

4.1.1.1.1. Наблюдение хромосферы в линии Hα ……	209
4.1.1.1.2. Изготовление перестраивающего объектива ……	210
4.1.1.1.3. Сборка и юстировка телеобъектива в штатной оправе ……	210
4.1.1.1.4. Исследование волнового фронта телеобъектива ……	212
4.1.1.1.5. Юстировка оптической системы хромосферного телескопа ……	213
4.1.1.1.6. Волновой фронт оптики хромосферного телескопа и «новый свет» ……..	214
4.1.1.2. Развитие технологии получения многослойных покрытий интерференционных фильтров с малым рассеянием и поглощением ……	215
4.1.1.3. Фазовые пластинки для поляризационных наблюдений. Сравнение методик измерений разности хода в фазовых пластинках из полимерных материалов ……...	218
4.1.2. Разработка и ввод в эксплуатацию автоматизированной системы управления большим солнечным вакуумным телескопом ……	224
4.1.2.1. Основные характеристики БСВТ ……...	224
4.1.2.2. Назначение и основные функции АСУ ……	225
4.1.2.3. Устройство АСУ ……	226
4.1.2.3.1. Общее описание ……	226
4.1.2.3.2. Сидеростат и купол ……	227
4.1.2.3.3. Главный объектив ……	228
4.1.2.3.4. Диагональное зеркало ……	228
4.1.2.3.5. Координатометр ……	228
4.1.2.3.6. Вакуумная установка ……	229
4.1.2.3.7. Программное обеспечение ……	230
4.1.3. Модернизация ССРТ во многоволновый (многочастотный) радиогелиограф. Создание спектрополяриметра 50-500 МГц. Разработка методики калибровки и обработки данных радиогелиографа и радио спектрополяриметров, развитие базы данных и обеспечение доступа к ней ……..	232
4.1.3.1. Описание многочастотного радиогелиографа ……	232
4.1.3.2. Методика фазовой калибровки и измерения разностей длин кабелей радиогелиографа ……	233
4.1.3.3. Методика совместной обработки данных спектрополяриметров и гелиографов	235
4.1.3.4. Обработка данных радиогелиографа: корреляционные кривые …….	236
4.1.3.5. Развитие базы данных радиогелиографа ……...	237
4.1.3.6. Спектрополяриметр 50–500 МГц …….....	237
4.1.4. Изучение астроклиматических характеристик и проблем улучшения качества изображений при разработке технических предложений для создания крупного солнечного телескопа. Разработка и апробация метода численной оценки интенсивности турбулентности в разных высотных атмосферных слоях по приземным измерениям структурных параметров воздушных течений …….	239
4.1.5. Программное обеспечение для приема и анализа сообщений о гамма-всплесках, оповещения оператора-наблюдателя о произошедшем событии ……	242

4.2. Фотометрические наблюдения и исследования нестационарных астрофизических объектов на телескопе АЗТ-33ИК ……	244
4.2.1. Оснащение телескопа АЗТ-33ИК спектрометрической и фотометрической аппаратурой ……..	244
4.2.2. Результаты наблюдений ……	245
4.3. Методы диагностики процессов солнечной активности и ее проявлений в ММП, магнитосфере и ионосфере Земли ……..	247
4.3.1. Диагностика солнечных факторов возмущений космической погоды ……	247
4.3.2. Диагностика возмущений магнитосферы и ионосферы Земли ……	248
5. Работа обсерваторий ……	249
5.1. Байкальская астрофизическая обсерватория ……	249
5.2. Саянская солнечная обсерватория ……	250
5.3. Радиоастрофизическая обсерватория ……	254
5.4. Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория ……	256
5.5. Норильская комплексная магнитно-ионосферная станция ……	261
5.6. Геофизическая обсерватория …….	267
5.7. Обсерватория радиофизической диагностики атмосферы ……..	271
6. Научно-организационная деятельность……	274
6.1. Общие сведения ……	274
6.2. Деятельность Ученого совета …….	278
6.3. Деятельность диссертационного совета …….	278
6.4. Международное сотрудничество ……..	279
6.5. Издательская деятельность ……..	290
6.6. Работа библиотеки ……	292
6.7. Работа с вузами …….....	292
6.8. Работа научно-образовательного центра ……	293
6.9. Работа музея ИСЗФ СО ……	294
6.10. Работа Совета научной молодежи Института ……..	295
6.11. Проведение научных мероприятий ……...	296
6.12. Участие в выставках ……..	298
6.13. Участие в научных мероприятиях …….	298
7. Публикации …….	300
7.1. Статьи в отечественных журналах ……..	300
7.2. Статьи в иностранных журналах, включая переводные …….....	305
7.3. Доклады в сборниках российских конференций ……...	312
7.4. Доклады в сборниках международных конференций ……..	318

7.5. Тезисы докладов на российских конференциях …….	324
7.6. Тезисы докладов на международных конференциях ……	329
7.7. Монографии ……..	340
7.8. Электронные публикации ……	340
7.9. Патенты ……..	343
7.10. Статьи, сданные в печать в российские издания …….	343
7.11. Статьи, сданные в печать в зарубежные издания ……	344
Содержание ……..	346

Отв. редактор ***И.И. Салахутдинова***
Редакторы ***Н.О. Волкова, М.В. Никонова***
Технические редакторы ***Н.В. Купрякова, И.Г. Амбаева***

Отчет утвержден Ученым советом ИСЗФ СО РАН
(протокол № 2 от 2.02.2017 г.)

****

Сдано в набор 20.12.2016 г. Подписано к печати 09.02.2017 г.
Формат 60×90 1/8. Гарнитура *Times New Roman.*
Усл. печ. л. 44.25. Уч.-изд. л. 53.1. Тираж 50. Заказ № 173.

****

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН,
Иркутск, Лермонтова 126А, а/я 291,
и в БМБШ ГОУ ВПО «ИГУ»,
664001, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1