

**2. Результаты научных исследований по завершенным космическим проектам, полученные российскими учеными в 2014-2015 годах**

**2.1 Создание новых инструментов и продолжение рядов наблюдений.**

В Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН завершен монтаж оборудования многоволнового радиогелиографа в диапазоне частот 4–8 ГГц (рис. 1). Получены первые радиоизображения Солнца на трех длинах волн одновременно (рис. 2).

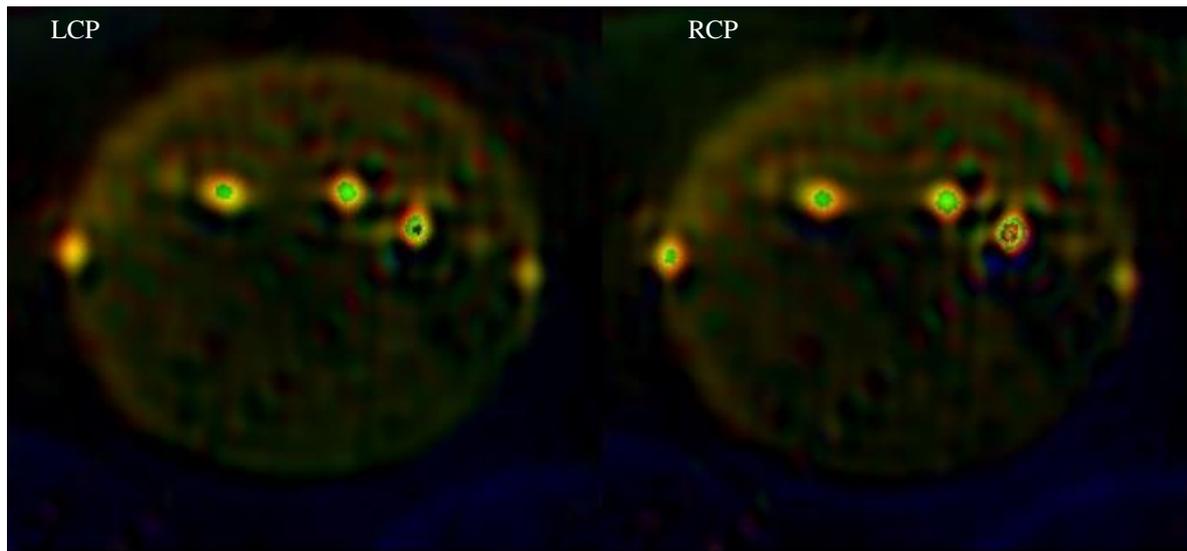


**Рис. 1.** Общий вид РАО. Крестообразная антенная решетка — многоволновый радиогелиограф диапазона 4-8 ГГц.

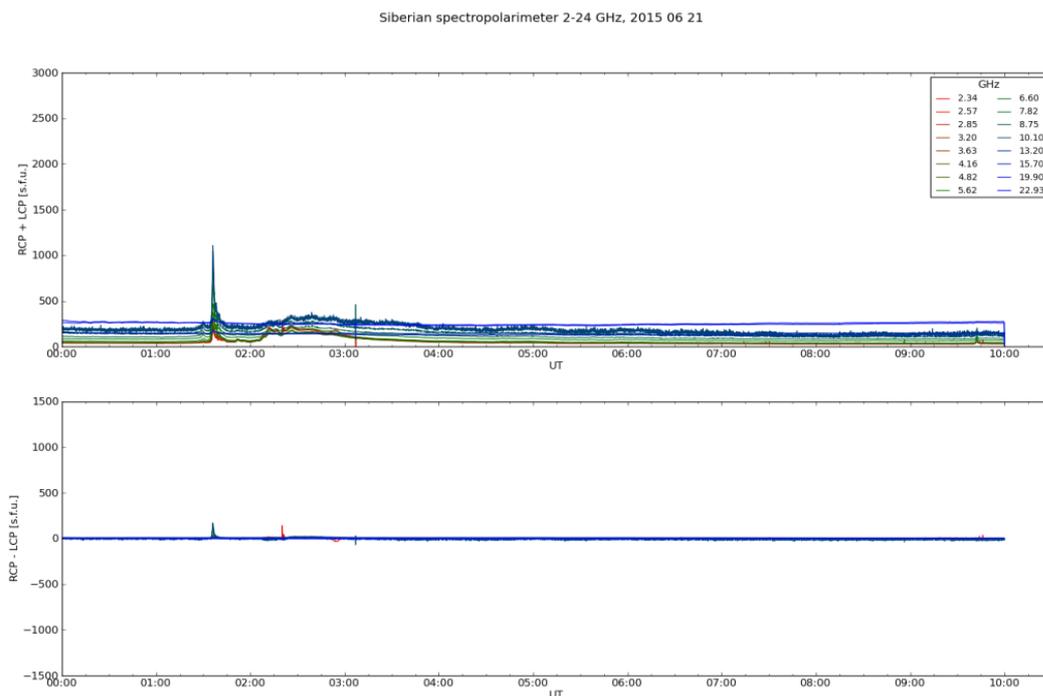
В Обсерватории также работают вспомогательные инструменты:

а) спектрополяриметр в диапазоне 4–8 ГГц с временным разрешением до 10 мс, количеством частотных каналов 26 и шириной полосы частот каждого

каналов 50 МГц.



**Рис. 2.** Гибридные колоризированные изображения Солнца на частотах в 5, 6 и 7 ГГц, полученные на многоволновом радиогелиогафе 2 мая 2016 г. в левой (LCP) и правой (RCP) круговой поляризациях. Трех частотам соответствует зеленый (5 ГГц), красный (6 ГГц) и синий (7 ГГц) цвета.



**Рис. 3.** Солнечная вспышка 21 июня 2015 г., зарегистрированная спектрополяриметром в интенсивности (I, сверху) и круговой поляризации (внизу). Диапазон 2–24 ГГц.

б) спектрополяриметр диапазона 2–24 ГГц, временем накопления сигнала в одном частотном канале до 0.1 с, частотным разрешением 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. Наблюдения осуществляются регулярно в светлое время суток, результаты наблюдений обрабатываются и хранятся как в обработанном, так и в исходном виде. На рис. 3 приведен пример наблюдения 21 июня 2015 г. солнечной вспышки в интенсивности на различных частотах в диапазоне 2–24 ГГц и круговой поляризации.

Калибровка многоволнового радиогелиографа производится по наблюдениям геостационарных спутников, Луны. Разрабатываются методики реконструкции изображений, получаемых многоволновым радиогелиографом.

Продолжается многолетний ряд наблюдений на ССРТ и спектрополяриметрах 2–24, 4–8 ГГц с обеспечением открытого доступа к данным, публикуемым на сайте обсерватории <http://badary.iszf.irk.ru>.

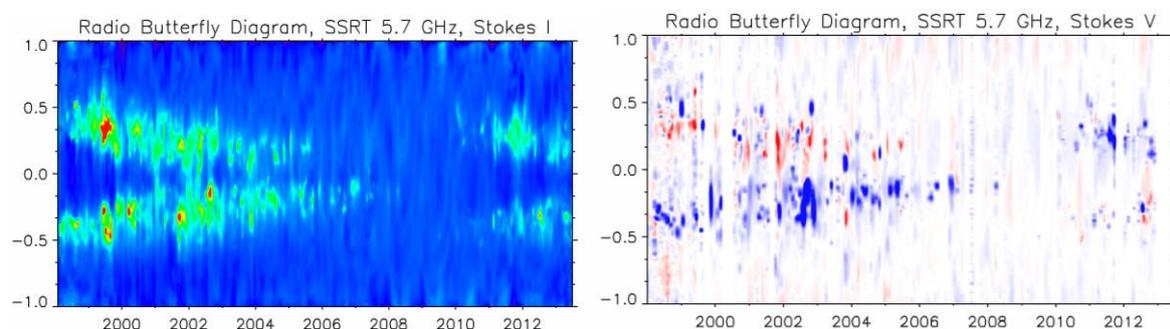
#### **Публикации:**

1. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph // *Research in Astronomy and Astrophysics*. , 2014. V. 14, Issue 7, 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. P. 287–294.

## 2.2 Синтезирование синоптических карт

Впервые синтезированы синоптические карты радиоизлучения Солнца на частоте 5.7 ГГц в интенсивности и круговой поляризации.

Карты созданы на основе долговременных наблюдений Солнца на Сибирском солнечном радиотелескопе в период с 1998 по 2013 г. Эти карты представляют долготно-широтные распределения (рис. 4) солнечного микроволнового излучения в 23-м и 24-м циклах активности и несут новую информацию об особенностях излучения активных областей, крупномасштабных источников теплового радиоизлучения, протуберанцев в короне Солнца. Общая структура распределения микроволнового излучения в циклах активности соответствует долговременным магнитографическим и оптическим наблюдениям. Разработанные методики будут использованы в синоптическом мониторинге на новом многоволновом радиогелиографе ССРТ.

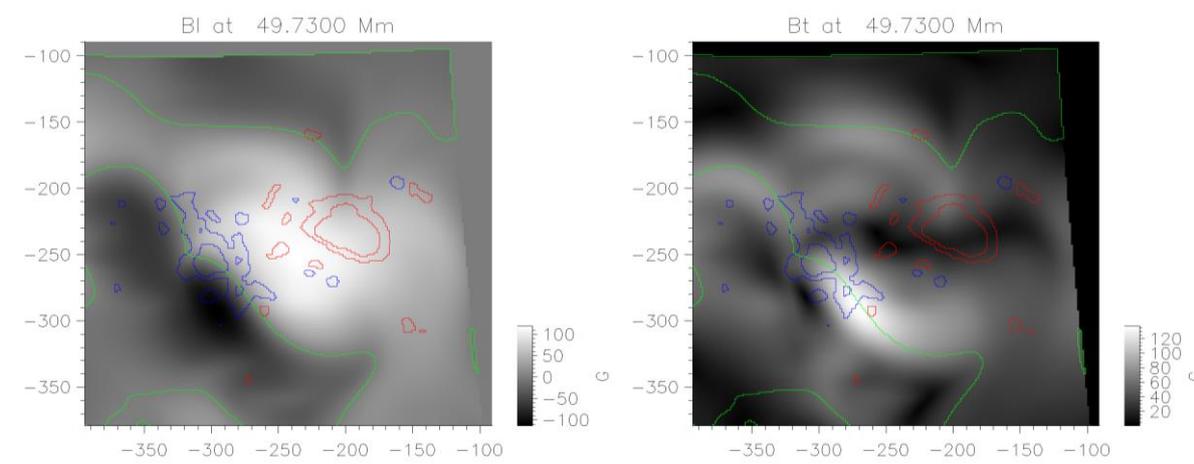


**Рис. 4.** Широтно-временная диаграмма микроволнового излучения в 23-м и 24-м циклах солнечной активности: левая панель — параметр Стокса I; правая панель — параметр Стокса V.

## 2.3 Интерпретация аномальной поляризации радиоизлучения АО

По данным ССРТ интерпретирована аномальная поляризация радиоизлучения с привлечением данных о восстановленном корональном магнитном поле. В предположении, что проходящее через эту область радиоизлучение меняет знак поляризации, проведено моделирование радиоизлучения с

использованием информации о восстановленном поле в качестве одного из входных параметров.



**Рис. 5.** Распределение восстановленного магнитного поля на высоте  $\sim 50$  Мм 4 мая 2013 г. на момент времени 5:00 UT, проецированное на картинную плоскость: слева — компонента вдоль луча зрения, справа — модуль поперечного поля. Синие и красные контуры отмечают отрицательную и положительную полярность на уровне фотосферы соответственно. Зеленым отмечена нейтральная линия на указанной высоте

Построенные модельные карты радиоизлучения повторяют зарегистрированную пространственную структуру поляризации. Привлечение для моделирования потенциального поля не позволило получить согласующейся с наблюдениями картины (рис. 5).

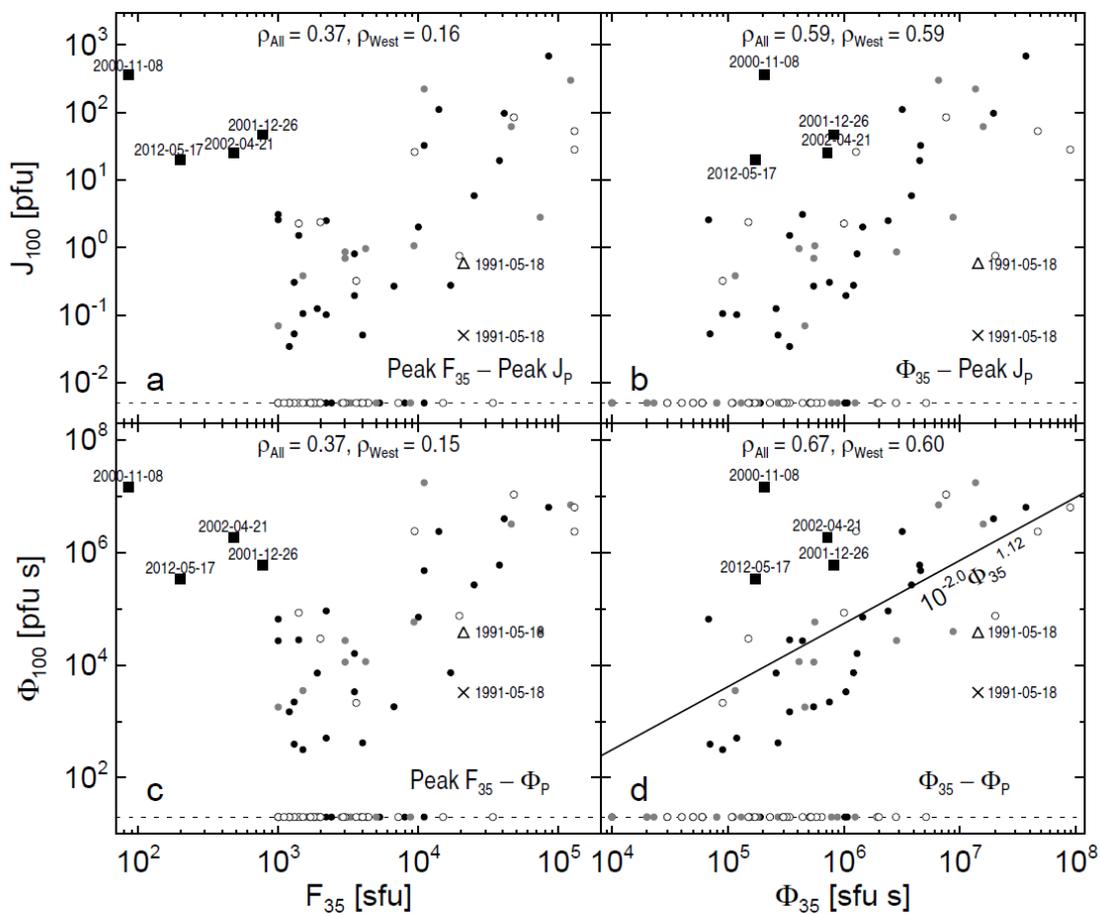
#### Публикации:

Кальтман Т.И., Кочанов А.А., Мышьяков И.И., Максимов В.П., Просовецкий Д.В., Тохчукова С.Х. Наблюдения и моделирование пространственного распределения и спектра микроволнового излучения активной области NOAA 11734 // Геомagnetизм и Аэрoномия. 2015. Т. 55, № 8. С. 1–7.

## 2.4 Связь микроволновых всплесков и околоземных протонных возрастаний.

Найдено соотношения между микроволновыми всплесками и околоземными протонными возрастаниями высоких энергий и их происхождение. Продолжено исследование соотношений между параметрами всплесков на частоте 35 ГГц, зарегистрированных радиополяриметрами Нобеяма в течение 25 лет, и солнечными протонными событиями. Изучены соотношения между микроволновыми флюенсами на 35 ГГц и флюенсами околоземных протонных возрастаний с энергиями выше 100 МэВ для выявления информации об их источниках и оценки диагностического потенциала радиовсплесков.

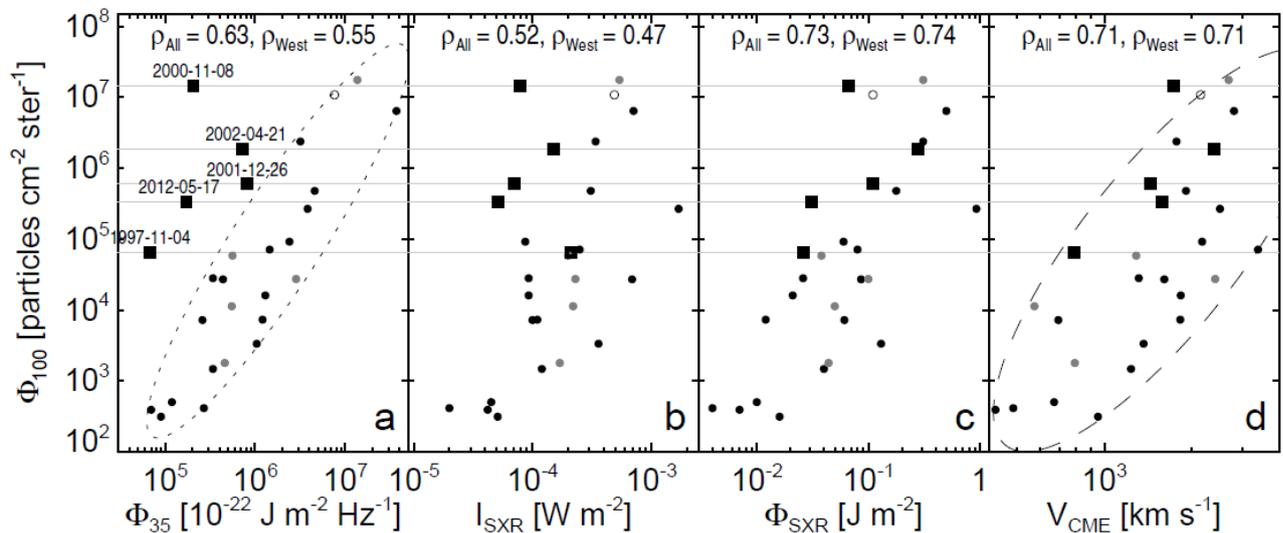
Корреляция между микроволновыми и протонными флюенсами значительно выше, чем между пиковыми значениями (рис. 6). Вероятно, это отражает зависимость полного числа протонов от длительности процесса их ускорения. В событиях с мощными вспышками коэффициенты корреляции флюенсов протонов высоких энергий с флюенсами микроволнового и мягкого рентгеновского излучения выше, чем со скоростями КВМ (рис. 7).



**Рис. 6.** Соотношения между различными комбинациями пиковых потоков и флюенсов микроволновых всплесков на частоте 35 ГГц и околоземных протонных возрастаний выше 100 МэВ. Черными квадратами обозначены мощные протонные события после умеренных микроволновых всплесков. Цвет кружков обозначает долготу  $\lambda$  солнечных источников: белые  $\lambda < E30$ , серые  $E30 \leq \lambda < W20$ , черные  $\lambda \geq W20$ . Коэффициенты корреляции указаны для всего набора событий ( $\rho_{All}$ ) и отдельно для западных событий ( $\rho_{West}$ ). Последние ниже, так как все нетипичные события, обозначенные квадратами, — западные.

Эти результаты указывают на статистически больший вклад вспышечных процессов в потоки протонов высоких энергий.

Ускорение ударными волнами выглядит менее значимым для высоких энергий в событиях, связанных с мощными вспышками, хотя их вклад вероятен и, возможно, превалирует в более слабых событиях. Установлено, что вероятность обнаружимого протонного возрастания прямо зависит от максимального потока, длительности и флюенса всплеска на частоте 35 ГГц; роль «синдрома большой вспышки» была ранее сильно преувеличена. Предложены эмпирические соотношения для микроволновой диагностики протонных возрастаний.



**Рис. 7.** Сравнение корреляций между протонными и микроволновыми флюенсами (a), пиковыми потоками (b) и флюенсами (c) мягкого рентгеновского излучения, скоростями КВМ (d). Обозначения те же, что и на рис. 6.

### **Публикации:**

Grechnev V.V., Kiselev V.I.; Meshalkina N.S., Chertok I.M. Relations between microwave bursts and near-earth high-energy proton enhancements and their origin // Solar Physics. 2015. V. 290. P. 2827–2855.

## **2.5 Анализ данных наблюдений вспышек**

Анализ данных наблюдений ряда вспышек в континуальном излучении которых наблюдалось обращение поляризации в интервале частот между 17 и 34 ГГц показал, что обращение связано с питч-угловой анизотропией излучающих электронов.

### **Публикации:**

Altyntsev A.T., Fleishman G.D., Kashapova L.K., Meshalkina N.S., Myshyakov I.I. Palshin V.D. Two-loop flare SOL2012-07-06: relationship between heating, acceleration and circular polarization sign inversion in microwaves // RadioSun-4 Workshop, 8–12 June 2015, ISTP, Irkutsk, Russian).

## **2.6 Пакет программ для моделирования микроволнового и рентгеновского излучения**

Развиты пакеты программ, позволяющие моделировать микроволновое и рентгеновское излучение. Архитектура программного обеспечения, развитая на основе IDL, позволяет пользователю: 1) импортировать фотосферные

магнитные поля и делать их экстраполяцию в корону; 2) исследовать магнитную топологию интерактивно созданных магнитных силовых линий и ассоциированных с ними магнитных петель; 3) заполнять петли неоднородной плазмой и ускоренными электронами с заданными параметрами; 4) исследовать пространственные и спектральные характеристики радио- и рентгеновского излучения; 5) сравнивать модельные и наблюдательные изображения. Программное обеспечение интегрирует коды расчета гиротронного и тормозного микроволнового излучения, расчета мягкого и жесткого рентгеновского излучения, программы экстраполяции магнитного поля в корону в линейном и нелинейном бессиловом приближении. Программное обеспечение оттестировано на относительно простых однопетельных конфигурациях.

#### **Публикации:**

1. Kuznetsov A.A., Van Doorselaere T., Reznikova V.E. Simulations of gyrosynchrotron microwave emission from an oscillating 3d magnetic loop // *Solar Physics*. 2015. V. 290, iss. 4. P. 1173–1194.
2. Nita G.M., Fleishman G.D., Kuznetsov A.A., Kontar E.P., Gary D.E. Three-dimensional radio and X-ray modeling and data analysis software: revealing flare complexity // *Astrophys. J.* 2015. V. 799. Id. 236. P. 15.
3. Reznikova V.E., Van Doorselaere T., Kuznetsov A.A. Perturbations of gyrosynchrotron emission polarization from solar flares by sausage modes: forward modeling // *Astronomy & Astrophysics*. 2015. V. 575. Id. A47, P. 9.

## **2.7 О природе инжекции и эффектах распространения нетепловых электронов**

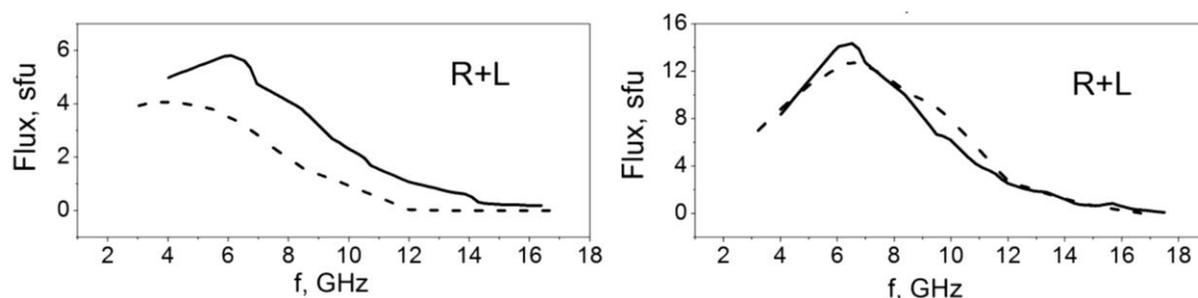
Получены результаты о природе инжекции и эффектах распространения нетепловых электронов. На примере вспышки 21 мая 2004 г. с простой однопетельной конфигурацией проведено сравнение данных микроволновых наблюдений с модельными, рассчитанными с помощью разработанной интерактивной IDL-технологии GX Simulator. Сравнительный анализ позволил определить пространственные и спектральные свойства распределения нетепловых электронов. Было показано, что излучение генерируется высокоэнергичными электронами с относительно жестким спектром, сконцентрированными вблизи вершины петли. В то же время поток электронов с энергией более 100 кэВ вблизи оснований был слишком мал, чтобы они могли быть зарегистрированы в интегральном потоке и на изображениях RHESSI. Изображения SOHO в вакуумном ультрафиолете и особенности низкочастотной части микроволновых спектров дают основание предполагать, что вспышечная петля погружена в среду с меньшим магнитным полем. Скорее всего, распределение энергичных электронов в рассматриваемой вспышке формируется в результате локализованного ускорения/инжекции электронов в вершине петли с последующими процессами захвата и рассеяния.

### **Публикации:**

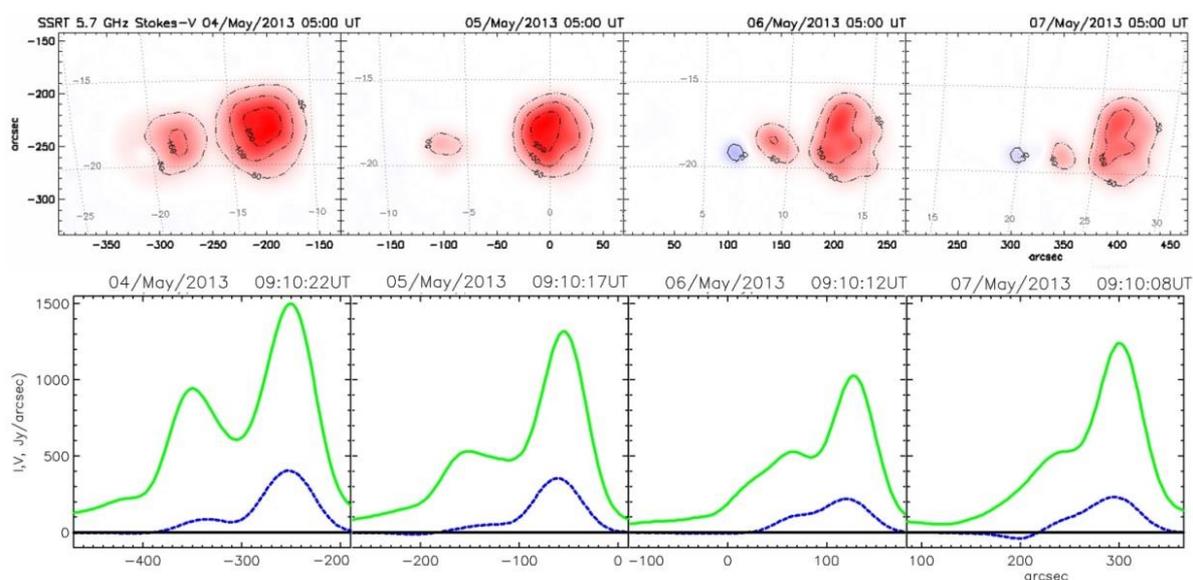
Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I., Kashapova L.K. CORONAS-F observation of HXR and gamma-ray emissions from the solar flare X10 on 29 October 2003 as a probe of accelerated proton spectrum // Contributions of the Astronomical Observatory SkalnatéPleso. 2015. V. 45. P. 42–59.

## 2.8 Моделирование микроволнового излучения солнечной активной области

Проведены микроволновые наблюдения солнечной активной области NOAA 11734 в период с 28 апреля по 8 мая 2013 г. радиотелескопами ССРТ и ПАТАН-600 (рис. 8).



**Рис. 8.** Спектры радиоизлучения АО 11734 для хвостового (левые панели) и головного (правые панели) пятен: сплошная кривая — наблюдаемый спектр ПАТАН-600, штриховая — результат моделирования.



**Рис. 9.** Двумерное распределение яркостных температур параметра Стокса V по наблюдениям ССРТ, 5.7 ГГц, для положительных (красный цвет) и отрицательных (синий цвет) значений (верхняя панель). Сканы ПАТАН-600 на частоте излучения 5.7 ГГц для полного (параметр Стокса I, зеленая линия) и поляризованного (параметр Стокса V, синяя линия) излучения 4, 5, 6 и 7 мая (нижняя панель).

В результате наблюдений получены двумерные распределения

параметров Стокса  $I$  и  $V$  (рис. 9) по данным ССРТ на частоте 5.7 ГГц и спектры микроволнового излучения в диапазоне 3–18 ГГц по данным RATAN-600. Восстановлена структура магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении, проведено моделирование свободно-свободного и гирорезонансного радиоизлучения.

Построены карты модельного распределения яркостных температур обеих круговых поляризаций радиоизлучения, которые повторяют зарегистрированную пространственную структуру поляризации во все дни наблюдений. Анализ наблюдательных данных и моделирование радиоизлучения позволяют объяснить особенности распределения поляризованного излучения в рамках механизма слабого взаимодействия мод радиоизлучения в квазипоперечном магнитном поле над солнечными пятнами.

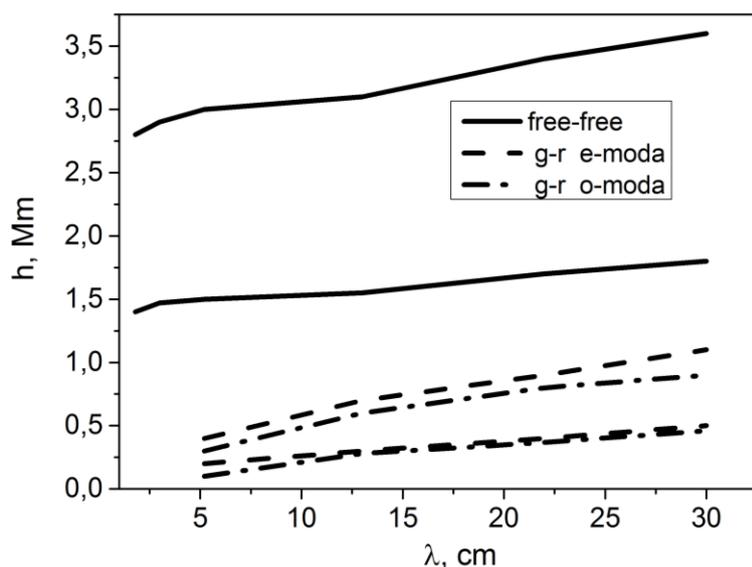
#### **Публикации:**

Кальтман Т.И., Кочанов А.А., Мышьяков И.И., Максимов В.П., Просовецкий Д.В., Тохчукова С.Х. Наблюдения и моделирование пространственного распределения и спектра микроволнового излучения активной области NOAA 11734 // Геомagnetизм и аэрoномия. 2015. Т. 55, № 8. С.1124–1130.

## **2.9 Моделирование радиоизлучения спокойного Солнца**

На основе реалистичной МГД-модели Vifrost солнечной атмосферы были проведены расчеты поляризованного радиоизлучения участка спокойного Солнца для диапазона длин волн 1,7–30 см. Изучение формирования радиоизлучения данной области позволило оценить относительные вклады теплового тормозного и циклотронного механизмов излучения и выявить некоторые особенности в картине распределения яркостных температур на

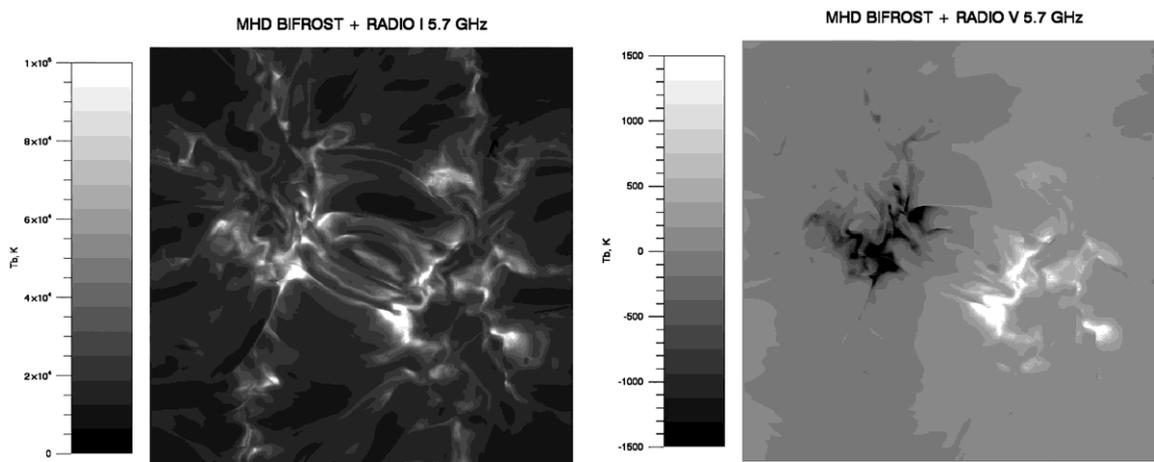
пространственных масштабах  $\sim 48$  км. Характеристики расчетного излучения оказались соответствующими наблюдательным данным РАТАН-600 и ССРТ для участков спокойного Солнца.



**Рис. 10.** Характерные высоты формирования микроволнового излучения  $h$  (мегаметры, вертикальная ось) в зависимости от длины волны  $\lambda$  (сантиметры, горизонтальная ось).

Как показало моделирование, для данной модели гирорезонансное излучение, формируясь на границах гранул на высотах до 1 Мм, поглощается в вышележащих слоях и не доступно наблюдению.

Тормозное, или свободно-свободное (free-free) тепловое излучение оптически плотно над всей рассчитанной областью с большим разбросом характерных высот, на которых оптическая плотность равна единице (рис. 10). Тонкая структура тормозного излучения зависит от неизотропных физических условий в трехмерной области (рис. 11). Вклад этого типа излучения для исследуемой модели Vifrost оказался  $\sim 100$  %.



**Рис. 11.** Двумерное распределение яркостных температур параметров Стокса I и V для 5.7 ГГц в МГД-модели Bifrost.

### Публикации:

Кальтман Т.И., Кочанов А.А. Исследование характеристик и особенностей радиоизлучения усиленной хромосферной сетки Солнца на основе реалистичной МГД-модели // Сборник трудов XIX Всероссийской ежегодной конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2015», С. 189–192, ISBN 978-5-9651-0935-7.

## 2.10 Модель радиоизлучения короны спокойного Солнца в диапазоне 1-100 см

Создана модель короны спокойного Солнца, удовлетворяющая наблюдательным данным излучения радиоволн в диапазоне 1–100 см и интенсивности корональных эмиссионных линий УФ-диапазона. При этом было найдено новое решение уравнения населенности уровней с применением стабилизирующих коэффициентов, имеющих вероятностный характер.

Сравнение расчетных и наблюдательных данных по большому числу эмиссионных линий показало их хорошее согласие и в то же время позволило выявить ряд линий с неточными атомными данными, а также продемонстрировало необходимость корректировки расчетов фракционной ионизации для одного иона. Полученное решение по расчету населенности уровней обеспечивает повышение точности диагностики плотности плазмы, нахождение меры эмиссии и температуры изотермальной плазмы. При расчетах интенсивности корональных линий по диску Солнца и над лимбом была применена зависимость избыточности элементов от температуры и давления в петлях модельной короны, что позволило определить среднюю величину избыточности по линии зрения в ближней короне. Это, в свою очередь, может быть использовано для улучшения диагностических процедур.

#### **Публикации:**

Криссинель Б.Б. Моделирование структуры спокойных участков атмосферы Солнца, соответствующей излучению в диапазоне волн 1–100 см // *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92, № 1. С. 1–14.

## **2.11 Различие режимов солнечной активности в глобальных минимумах и вне их**

Предложено объяснение различия режимов солнечной активности в глобальных минимумах и вне их. Два режима активности можно объяснить гистерезисом: наличием двух решений уравнений динамо с существенно различающимися амплитудами магнитных циклов, реализующихся в зависимости от начальных условий. Флуктуации параметров динамо приводят к

нерегулярным переходам между различными решениями. В текущем году гистерезис в динамо был подтвержден трехмерными численными экспериментами, которые, однако, связаны с большими затратами машинного времени и не позволяют рассчитать достаточное количество магнитных циклов для определения их статистических свойств. Такую возможность представляет простое приближение динамо-волн, в котором было рассчитано около миллиона магнитных циклов, функция распределения амплитуд которых подтверждает существование двух мод для солнечной активности.

#### **Публикации:**

1. Karak B.B., Kitchatinov L.L., Brandenburg A. Hysteresis between distinct modes of turbulent dynamos // *Astrophys. J.* 2015. V. 803. P. 95.
2. Кичатинов Л.Л., Непомнящих А.А. Параметрическая модуляция динамо-волн // *Письма в АЖ.* 2015. Т. 41. С. 409.

#### **2.12 Новые знания о характеристиках нетепловых электронов, генерируемых во время солнечных вспышек**

Получены новые знания о характеристиках нетепловых электронов, генерируемых во время солнечных вспышек. Жесткое рентгеновское и гамма-излучение в диапазоне 0.04–150 МэВ, ассоциированное со вспышкой 29 октября 2003 г. (X10/3B), наблюдалось в 20:38–20:58 UT с помощью спектрометра СОНГ на борту КОРОНАС-Ф. Сравнение энергетических спектров, построенных по данным СОНГ и RHESSI, показало их близость в диапазоне 0.1–10 МэВ. Были выделены две стадии в развитии спектров: 20:38:00–20:44:20 UT и 20:44:20–20:58:00 UT. Во время второй стадии выросла эффективность ускорения протонов относительно ускорения электронов высоких энергий.

В частности, линия пионного распада статистически значима только во второй фазе вспышки. Оценка степенного индекса протонов по отношению пионной и гамма-линий дает значение 3.7. Изменения в характеристиках ускорения согласуются с синхронными изменениями в пространственной структуре вспышки. Вспышка ассоциируется с GLE 66. Показано, что времена старта GLE и появления пионной линии согласуются.

#### **Публикации:**

Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I., Kashapova L.K. CORONAS-F observation of HXR and gamma-ray emissions from the solar flare X10 on 29 October 2003 as a probe of accelerated proton spectrum // Contributions of the Astronomical Observatory SkalnatéPleso. 2015. V. 45. P. 42–59.

### **2.13 Высотная стратификация пространственного распределения мощности низкочастотных колебаний в активных областях**

Была найдена высотная стратификация пространственного распределения мощности низкочастотных осцилляций (0,7–2 МГц) лучевой скорости и интенсивности в активных областях. Разработан сейсмологический метод измерения высотного расстояния и средней скорости звука между слоями атмосферы тени солнечного пятна, наблюдаемыми на разных длинах волн. Предложенная методика позволяет оценить эти величины, не вводя дополнительных предположений о скорости звука или высотах формирования излучения.

С использованием данной методики получены оценки расстояния между излучающими слоями в температурном минимуме (1600 Å) и в переходной зоне (304 Å) над тенью солнечных пятен в трех активных областях: NOAA 11131,

11582, 11711. Также получены оценки значения средней скорости звука. Среднее расстояние между температурным минимумом и переходной зоной составило около 500–800 км, а соответствующая средняя скорость звука 30 км/с, что близко к средней скорости звука в солнечной атмосфере.

#### **Публикации:**

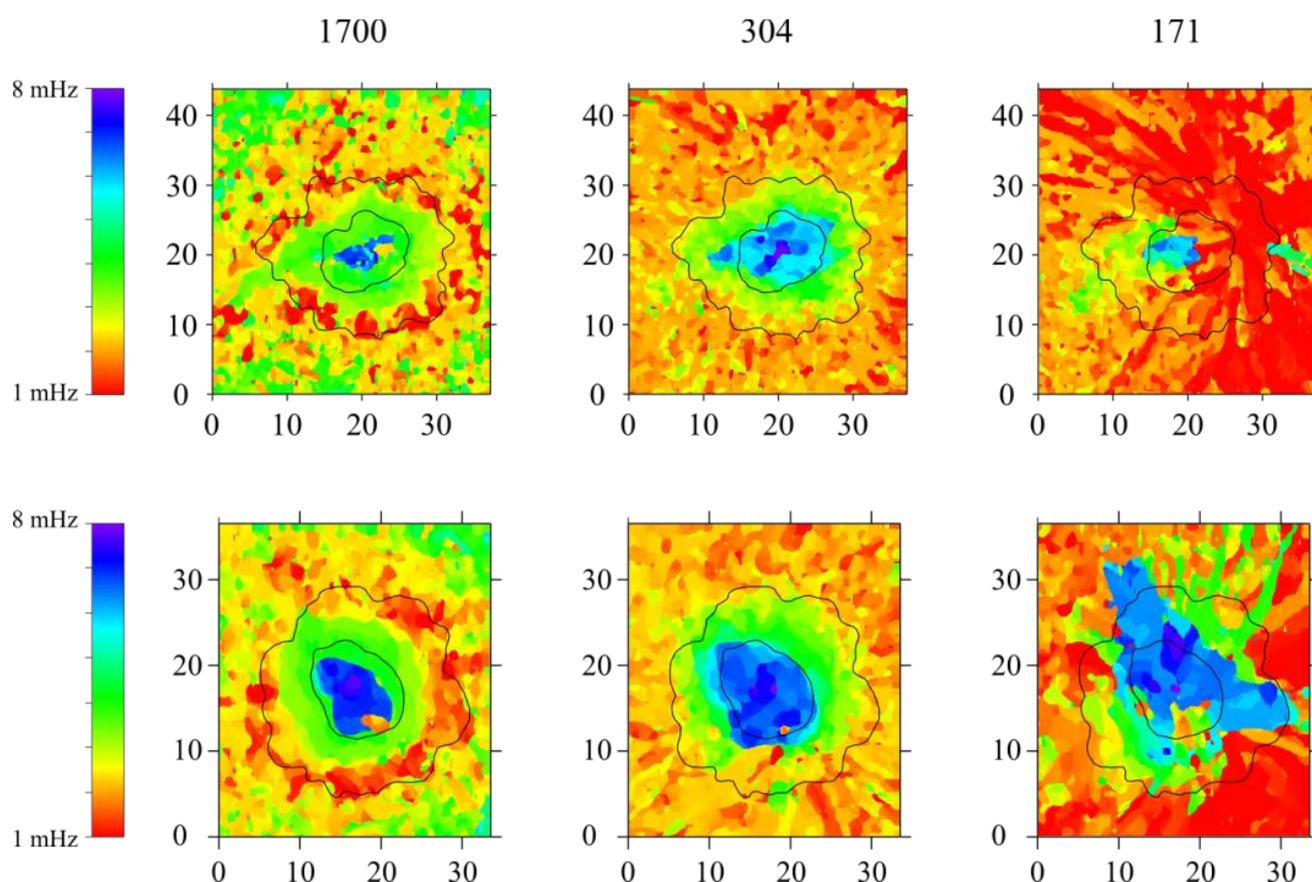
Deres A.S., Anfinogentov S.A. Measurement of the formation heights of UV and EUV emission above sunspot umbrae from observations of three-minute oscillation // *Astronomy Reports*. 2015. V. 59. P. 959–967.

### **2.14 Многоволновые измерения характеристик распространяющихся колебаний**

Произведены многоволновые измерения характеристик распространяющихся колебаний. В исследованиях пространственной структуры 3-минутных колебаний в солнечных пятнах было обнаружено, что они распространяются в окружающую атмосферу по каналам — магнитным трубкам. Оказалось, что такие каналы могут замыкаться на области, в которых инициируются солнечные вспышки.

Для исследования была выбрана вспышка 7 июня 2012 г. с максимумом в 05:56 UT и мощностью C1.5, перед которой на корреляционных кривых радиогелиографа Нобеяма наблюдались колебания с периодом около 3-мин. Флуктуации корреляционных кривых отражают изменения структуры и интенсивности излучения компактных источников на частоте 17 ГГц. Было обнаружено, что амплитуда колебаний росла в течение 30 мин. перед вспышкой. Пространственно-временные распределения амплитуд волн в радио- и ультрафиолетовом излучении (SDO/AIA 94 и 171 Å) были получены с помощью метода пиксельной вейвлет-фильтрации. Показано, что 3-мин.

колебания генерировались в пятне и распространялись по выбранным направлениям — магнитным каналам. Во время этой стадии были обнаружены (в последовательностях изображений на частоте 17 ГГц) поперечные колебания вспышечной петли с периодом около 30 с. Высотные разрезы пространственной локализации частотных мод в активных областях позволяют проследить путь волновых возмущений (рис. 12).



**Рис. 12.** Пример пространственной локализации колебаний в двух пятнах на длинах волн 1700, 304 и 171 Å. Цветом отражена частота колебаний (см. легенду слева рисунков), по горизонтальным и вертикальным осям пространственные координаты в угловых секундах.

#### Публикации:

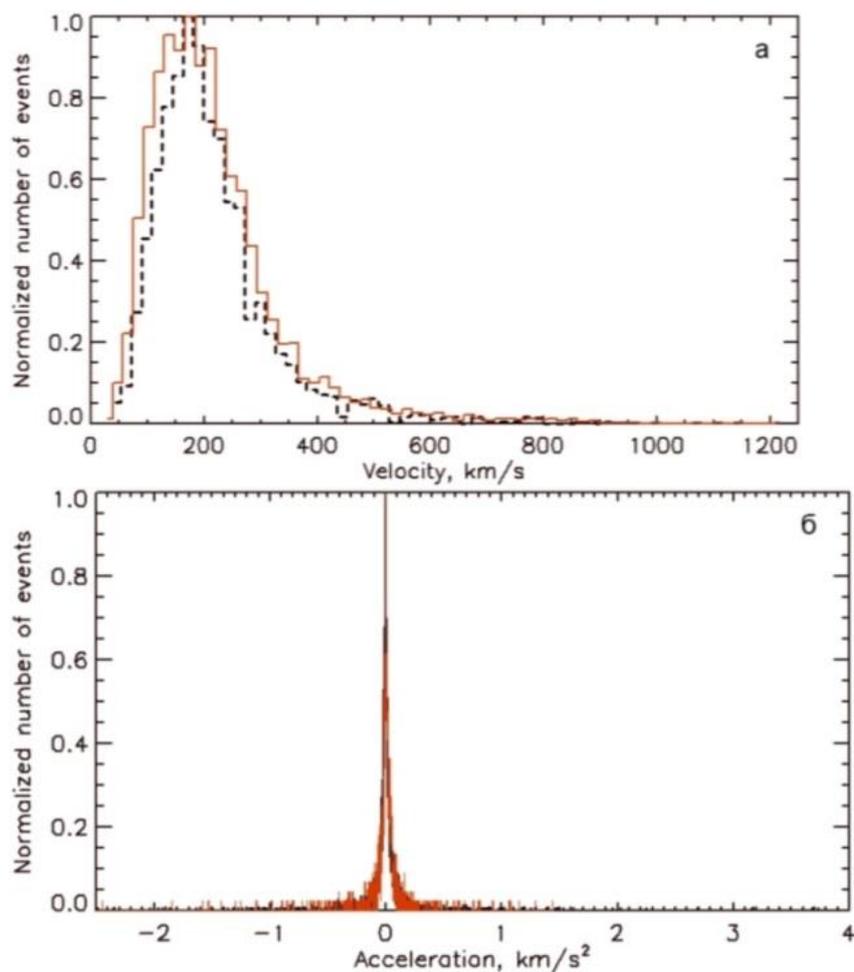
1. Sych R., Karlický M., Altyntsev A., Dudík J., Kashapova L. Sunspot waves and flare energy release // *Astronomy & Astrophysics*. 2015. V. 577. Id. A43, P. 8.

2. Сыч Р. Волны и колебания в атмосфере солнечных пятен: обзор // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 3–21.

### **2.15 Характеристики неоднородностей в потоках солнечного ветра на расстояниях от 3 до 15 солнечных радиусов по данным STEREO.**

Были исследованы характеристики неоднородностей в потоках солнечного ветра на расстояниях от 3 до 15 солнечных радиусов по данным STEREO.

Определялись такие параметры неоднородностей, как форма, размеры, время формирования, изменение скорости и ускорения (рис. 13). Проведено сравнение полученных значений для полярных и низкоширотных областей солнечной короны. Найдено, что потоки СВ испытывают значительные изменения скорости с ускорениями обоих знаков в полярных и низкоширотных областях короны, что может быть объяснено наличием МГД-сил, действующих на потоки СВ, и формированием турбулентности на фронтах потоков. Были исследованы источники неоднородностей и возможные области их образования по данным AIA/SDO и EUVI/STEREO.



**Рис. 13.** Нормализованная гистограмма скоростей (а) и ускорений (б) СВ в полярных и низкоширотных областях солнечной короны. Красным цветом показаны результаты для полярных областей, черным — для низкоширотных.

#### Публикации:

Кудрявцева А.В., Просовецкий Д.В. Источники мелкомасштабных неоднородностей в солнечном ветре и динамические параметры потоков солнечного ветра во внешней короне Солнца // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды. XIV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, 2015. С. 33–35.

## **2.16 Изменения поля в активной области, сопровождающие возникновение коронального выброса массы (КВМ) от 07.06.2011, связанного с эрупцией волокна и со вспышкой**

По данным векторных измерений фотосферного магнитного поля инструментом SDO/HMI исследованы изменения поля в активной области, сопровождающие возникновение коронального выброса массы (КВМ) от 07.06.2011, связанного с эрупцией волокна и со вспышкой. Анализировались вариации модуля магнитной индукции  $B$ , радиальной компоненты поля  $B_r$ , а также угла  $\alpha$  между силовыми линиями поля и радиальным направлением из центра Солнца.

Установлено, что событию предшествует всплытие нового магнитного потока (НМП) в нескольких местах. В одном участке вблизи северо-восточного конца эруптивного волокна НМП представлял собой маленькое пятно — пору, полярность и амплитуда поля в которой благоприятствовали магнитному пересоединению с окружающим полем. Исследованы вариации углов  $\alpha$  до и после начала события в различных участках активной области, в которой произошло рассматриваемое событие. Обнаружено, что угол  $\alpha$  уменьшается с разной быстротой за несколько часов до начала события в нескольких рассмотренных участках. В области вспышки в окрестности нейтральной линии магнитного поля наблюдаются резкое возрастание поперечной компоненты поля и увеличение примерно на 25–30 % угла наклона силовых линий поля к радиальному направлению после начала события. Этот эффект, предсказанный рядом исследователей, был обнаружен впервые.

### **Публикации:**

Файнштейн В.Г., Егоров Я.И., Руденко Г.В., Анфиногентов С.А.  
Вариации магнитного поля, сопровождающие возникновение КВМ,  
связанного с эрупцией волокна // Труды XIX Всероссийской

ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2015» (5–9 октября 2015 г., ГАО РАН, СПб.), С. 359–362.

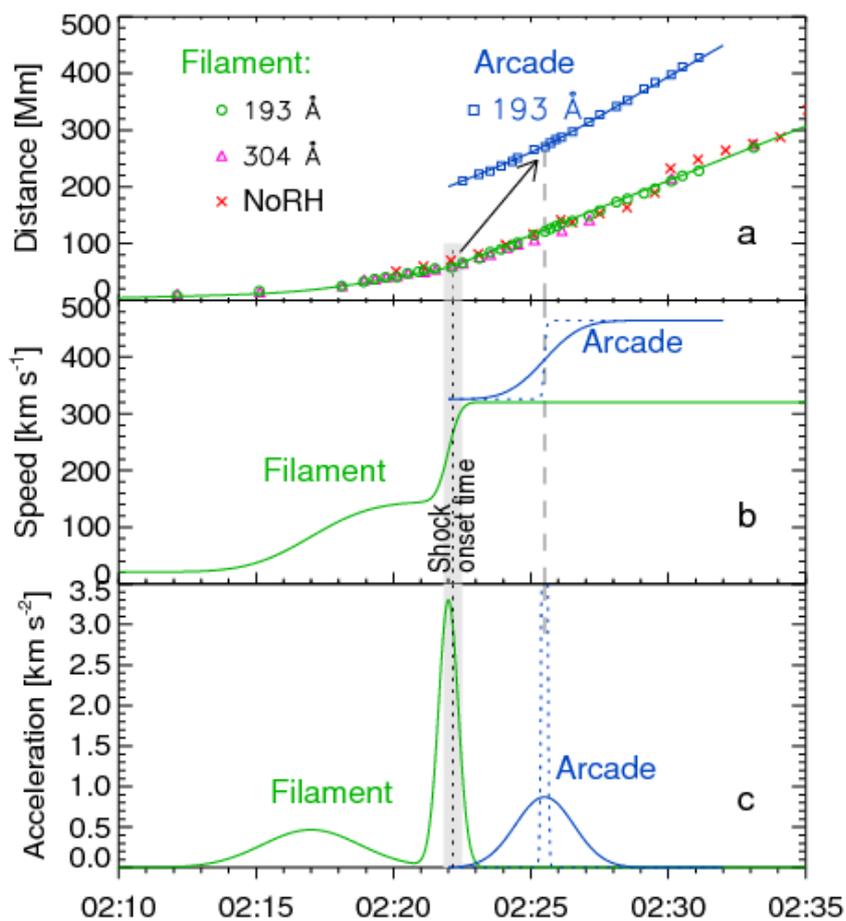
## **2.17 Роль солнечного волокна в создании вспышки, КВМ и ударной волны**

Показана ключевая роль солнечного волокна в создании вспышки, КВМ и ударной волны. Предложен обновленный сценарий эруптивной вспышки, коронального выброса массы (КВМ) и эволюции ударной волны. Начальная дестабилизация волокна приводит к вытяжению магнитных нитей, принадлежащих его телу и укорененных в фотосфере вдоль линии инверсии. Их пересоединение приводит:

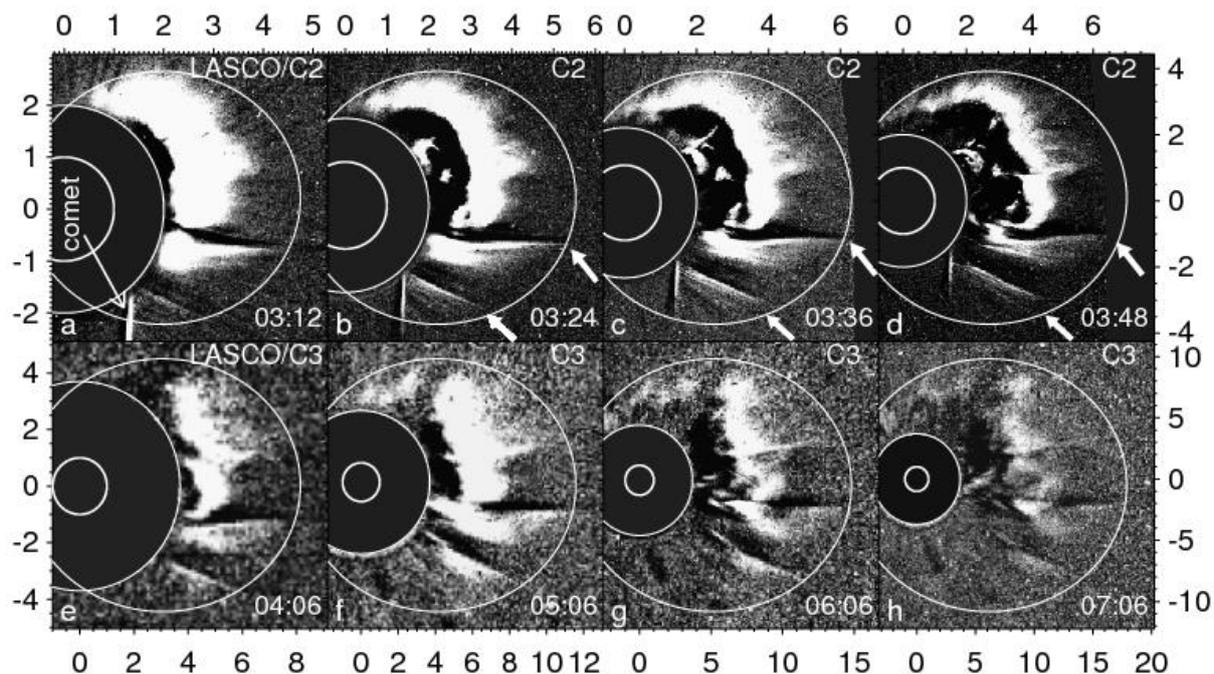
- 1) к нагреву частей волокна или его окружения;
- 2) к начальному возникновению вспышечных каспа, аркады и лент;
- 3) к нарастающему сходству волокна с округлым магнитным жгутом;
- 4) к его ускорению.

Затем предэруптивная аркада, охватывавшая волокно, вовлекается в пересоединение согласно стандартной модели, продолжая формирование вспышечных аркады и лент. Полоидальное магнитное поле в искривленном жгуте, формирующемся из волокна, неуклонно нарастает, форсируя его тороидальное расширение. Магнитный жгут импульсно расширяется, возбуждая магнитогидродинамическое возмущение, которое быстро укучается в ударную волну (рис. 14). Волна проходит сквозь аркаду, расширяющуюся над волокном, и затем в течение некоторого времени распространяется перед КВМ подобно замедляющейся взрывной волне (рис. 15). Если КВМ медленный, то ударная волна со временем затухает. В противном случае передняя часть ударного фронта переходит в поршневой

режим. Установлено, что пересоединение в токовом слое удаленного стримера, вызванное прохождением ударного фронта, возбуждает в стримере бегущий процесс, подобный вспышке, ответственный за радиоизлучение II типа.



**Рис. 14.** Эруптивное событие 11 мая 2011 г. Кинематика эруптивного волокна и аркады над ним и возникновение волны. а. Расстояние волокна и аркады от фотосферы. б. Скорость удаления волокна и аркады от Солнца. с. Ускорение волокна и аркады. Вертикальными линиями отмечено время возникновения ударной волны.



**Рис. 15.** След волны перед КВМ в событии 11 мая 2011 г. Скорость эллиптической огибающей волнового следа монотонно снижается согласно кинематике ударной волны.

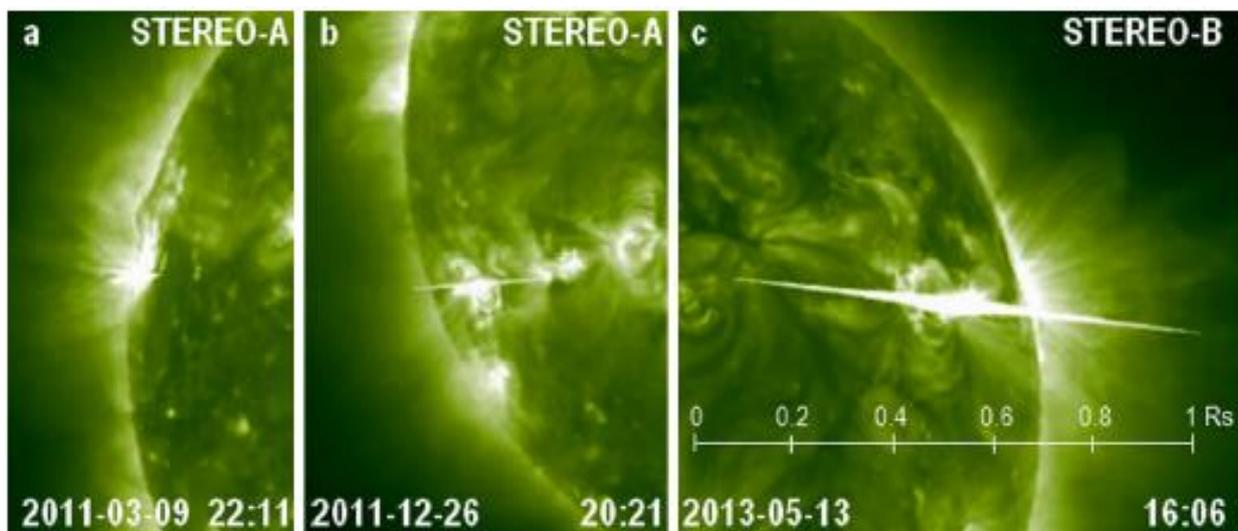
#### Публикации:

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V., Kochanov A.A., Chertok I.M., Kalashnikov S.S. Responsibility of a filament eruption for the initiation of a flare, CME, and blast wave, and its possible transformation into a bow shock // *Solar Physics*. 2015. V. 290. P. 129–158.

### 2.18 Способ оценки рентгеновского балла солнечных залимбовых вспышек, наблюдавшихся STEREO/EUVI

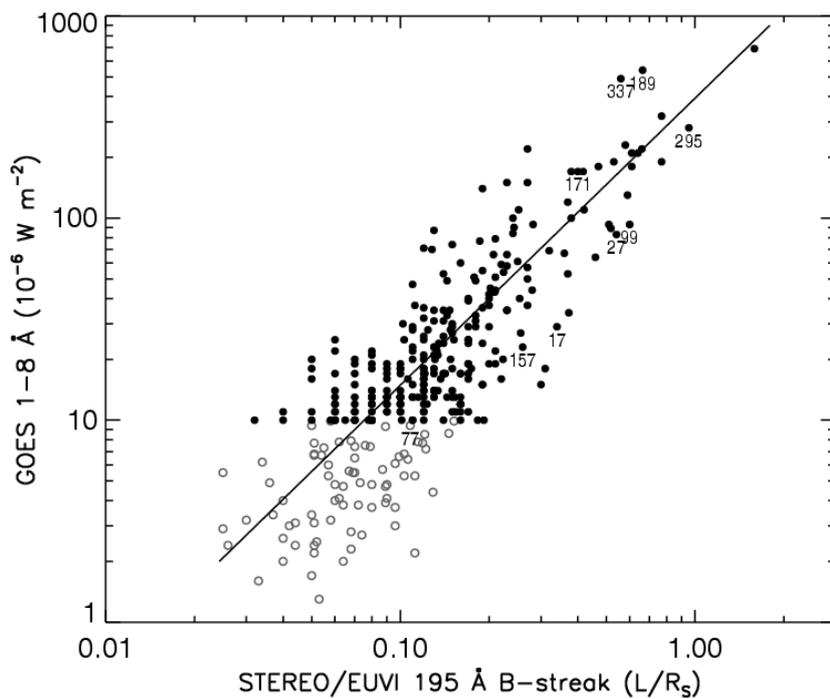
Предложен простой способ оценки рентгеновского балла солнечных залимбовых вспышек, наблюдавшихся STEREO/EUVI. Около максимума значительных вспышек на изображениях STEREO/EUVI 195 Å возникают эффекты перегрузки (блуминг), проявляющиеся как почти горизонтальные полосы по бокам от наиболее ярких вспышечных источников (рис. 16). Показано, что длину этих перегрузочных полос можно использовать для

решения проблемы оценки мягкого рентгеновского потока и балла вспышек за лимбом, зарегистрированных на одном из двух космических аппаратов STEREO, но невидимых с Земли. С этой целью по данным о примерно 350 вспышках, наблюдавшихся с января 2007 по июль 2014 г. (в основном превышавших уровень M1.0), установлено эмпирическое соотношение  $F_G=392 \cdot (L/R_S)^{1,42}$ , связывающее пиковый поток GOES в диапазоне 1–8 Å  $F_G$  с относительной длиной перегрузочной полосы  $L/R_S$  (рис. 17).



**Рис. 16.** Изображения STEREO/EUVI в канале 195 Å с полосой блуминга, типичной для вспышек баллов C (a), M (b) и X (c). Масштаб, показанный на панели (c), одинаков для всех трех кадров.

Это позволило оценить рентгеновские баллы примерно 65 мощных вспышек за лимбом, наблюдавшихся на STEREO в эти же годы. Результаты этого простого и оперативного метода согласуются с оценками, основанными на вычислении отклика телескопов EUVI от всего солнечного диска. Кроме того, исследованы некоторые особенности перегрузочных полос в импульсных и продолжительных вспышках. Показано, что эти полосы, присутствующие в последовательных изображениях EUVI, могут быть использованы для реконструкции вероятной истории мощных вспышек за лимбом.



**Рис. 17.** Соотношение между максимальной относительной длиной полосы блуминга  $L/R_s$  по наблюдениям на телескопах STEREO/EUVI в канале  $195 \text{ \AA}$  и пиковым потоком мягкого рентгеновского излучения GOES в диапазоне  $1\text{--}8 \text{ \AA}$ . Светлыми кружками обозначены вспышки балла C, темными – вспышки баллов  $\geq M1$ .

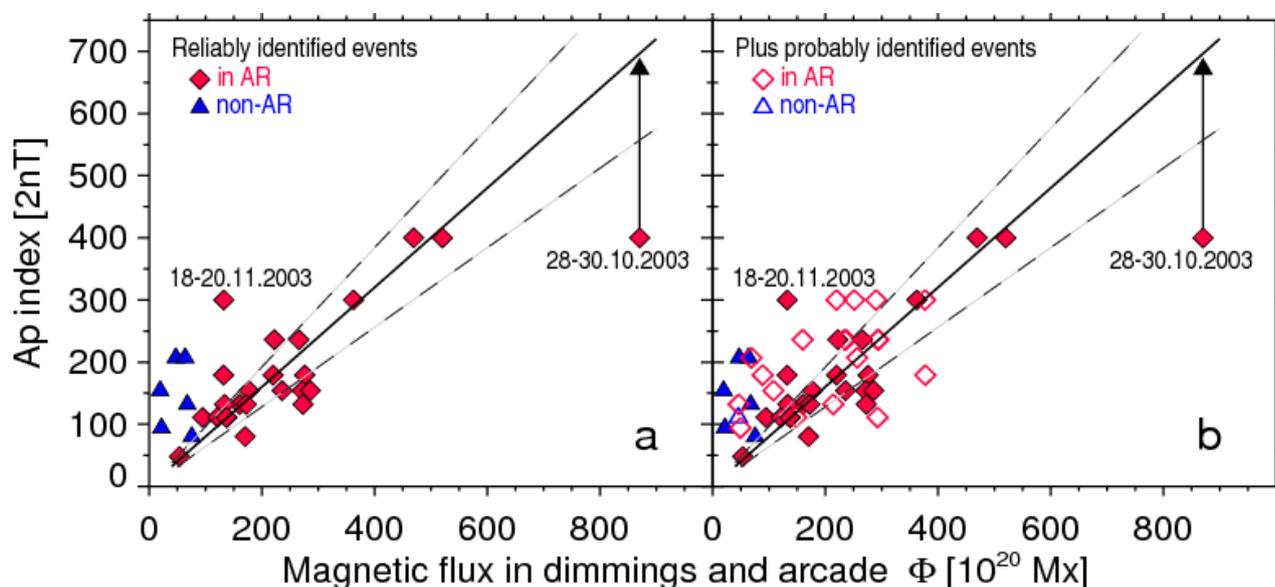
#### Публикации:

Chertok I.M., Belov A.V., Grechnev V.V. A Simple Way to Estimate the Soft X-ray Class of Far-Side Solar Flares Observed with STEREO/EUVI // Solar Physics. V. 290. P. 947–1961.

### 2.19 Соотношение между магнитным потоком, вовлеченным в солнечные эрупции, и $A_p$ -индексом геомагнитных бурь

Найдено соотношение между магнитным потоком, вовлеченным в солнечные эрупции, и  $A_p$ -индексом геомагнитных бурь. Солнечные корональные выбросы (КВМ) — главные источники наиболее мощных нерекуррентных геомагнитных бурь. В крайнем ультрафиолетовом излучении КВМ сопровождаются яркими постэруптивными аркадами и темными диммингами. Анализ событий 23-го

солнечного цикла показал, что суммарный беззнаковый магнитный поток  $\Phi$  в областях аркад и диммингов на уровне фотосферы значимо связан с интенсивностью геомагнитных бурь, описываемой индексом  $D_{st}$ . Этот факт дает основу для наиболее ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций. На том же наборе данных показано наличие значимой корреляции также между эруптивным магнитным потоком  $\Phi$  и геомагнитным индексом  $A_p$  (рис. 18).



**Рис. 18.** Соотношение между эруптивным магнитным потоком  $\Phi$  (горизонтальная ось) и  $A_p$ -индексом (вертикальная ось): слева — магнитные бури, солнечные источники которых надежно отождествлены, справа — добавлены события с вероятным отождествлением.

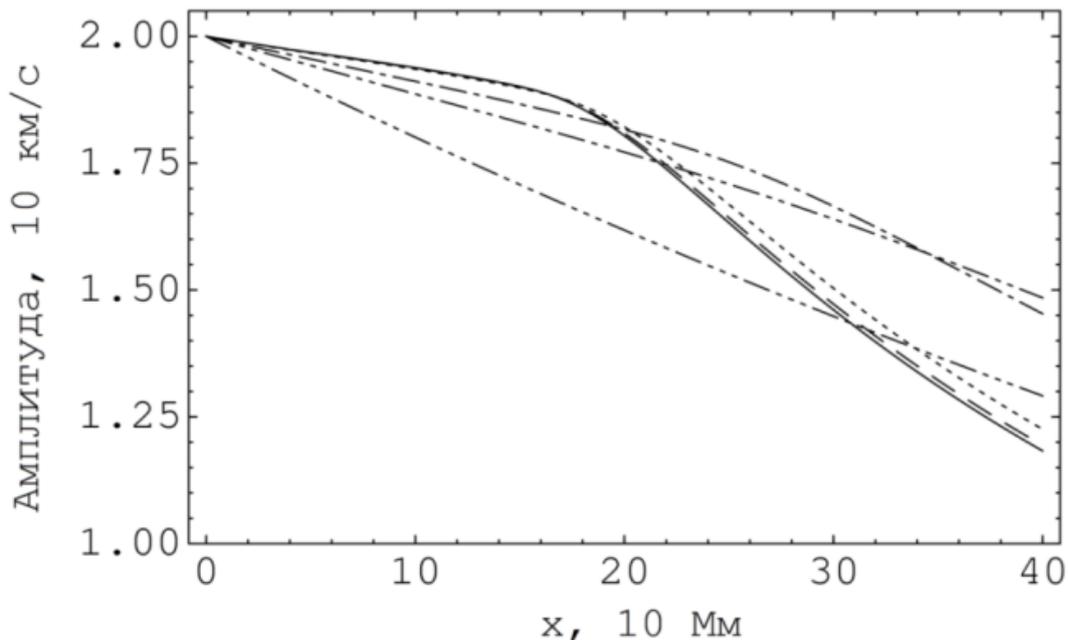
При нарастании магнитного потока от нескольких десятков до  $\approx 500$  (в единицах  $10^{20}$  Мкс) интенсивность геомагнитной бури, измеряемая трехчасовым  $A_p$ -индексом, увеличивается в среднем от  $A_p \approx 50$  до формального верхнего предела 400 (в единицах 2 нТл). Установленное соотношение  $A_p = 0.8 \Phi$  показывает, что реальное значение  $A_p$ -индекса не ограничено и во время наиболее сильных магнитных бурь может значительно превосходить 400.

### **Публикации:**

Chertok I.M., Abunina M.A., Abunin A.A., Belov A.V., Grechnev V.V.  
Relationship between the magnetic flux of solar eruptions and the  $A_p$   
index of geomagnetic storms // Solar Physics. 2015. V. 290. P. 627–633.

## **2.20 Нелинейные эффекты в распространении медленных магнитозвуковых волн в корональных плазменных структурах**

Рассмотрены нелинейные эффекты в распространении медленных магнитозвуковых волн в корональных плазменных структурах. Теоретически рассмотрена динамика наблюдаемых продольных волн в корональных перьевых структурах с учетом диссипации, нелинейности, магнитной природы волн и волноводного характера их распространения. Выведено эволюционное уравнение типа Бюргерса, описывающее распространение слабонелинейных медленных магнитозвуковых волн в однородных тонких магнитоплазменных трубках. Получены задержка в образовании ударных фронтов в профиле трубочной волны, а также более интенсивное затухание трубочной волны в сравнении со звуковыми волнами. Оба полученных эффекта существенны для случая  $\beta \sim 1$  и  $\beta > 1$ ; напротив, при  $\beta \ll 1$  эволюция трубочной волны слабо отличается от эволюции звуковых волн (рис. 19).



**Рис. 19.** Изменение амплитуды трубочной волны для различных значений плазменного параметра  $\beta$ . Пунктирная, штриховая, штрихпунктирная, 2-штрихпунктирная и 3-штрихпунктирная линии соответствуют значениям альфвеновской скорости 866, 433, 130, 87 и 43 км/с, скорость звука в короне 175 км/с. Значение кинематической вязкости  $2.4 \times 10^{14}$  см<sup>2</sup>/с. Сплошная линия соответствует случаю бесконечно сильного магнитного поля, т. е. обычным звуковым волнам.

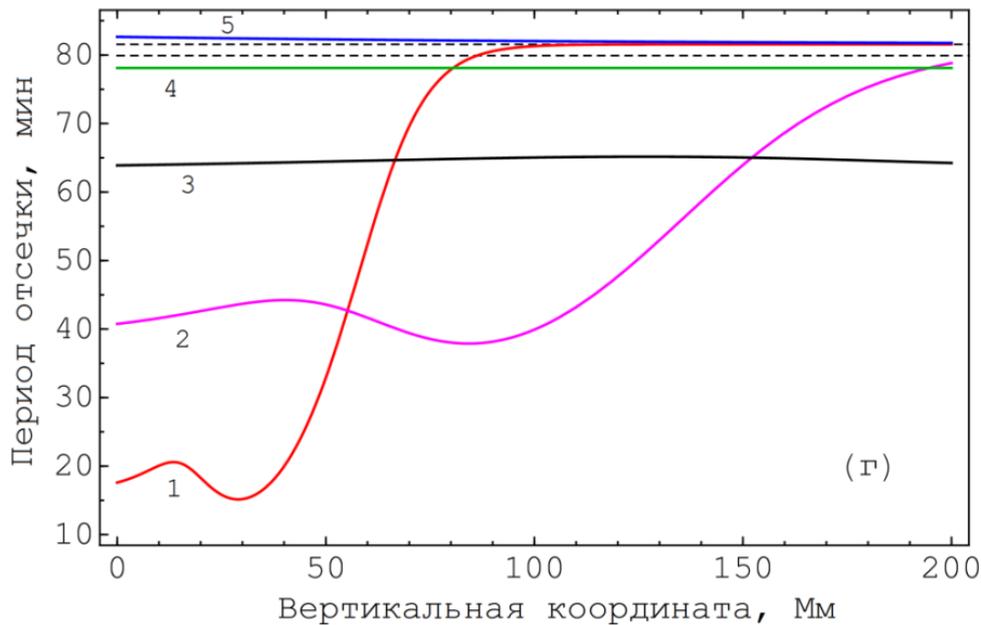
Поэтому для анализа продольных волн в нижней части корональных перьев и в магнитных веерных структурах с температурой плазмы  $\sim 1$  МК могут использоваться модели, развитые для слабонелинейных звуковых волн. С другой стороны, полученные эффекты важны для анализа эволюции продольных волн в горячих вспышечных петлях, магнитных веерных структурах, заполненных горячей плотной плазмой ( $> 6$  МК), корональных перьях с  $\beta \sim 1$  (выше в короне).

#### Публикации:

Afanasyev A.N., Nakariakov V.M. Nonlinear slow magnetoacoustic waves in coronal plasma structures // *Astronomy & Astrophysics*. 2015. V. 573. P. A32.

## 2.21 Влияние магнитной природы продольных волн в корональных плазменных трубках и волноводный характер их распространения

Показано, что влияние магнитной природы продольных волн в корональных плазменных трубках и волноводный характер их распространения приводят к существенному понижению значений периода отсечки волн в сравнении с моделями звуковых волн и трубочных волн в приближении постоянной альфвеновской скорости в трубке.



**Рис. 20.** Высотная зависимость периода отсечки продольных волн в экспоненциально расходящейся магнитной трубке для случая  $\beta \ll 1$ . Различные кривые соответствуют разным значениям характерного масштаба  $L$  изменения магнитного поля с высотой в сравнении с масштабом барометрического изменения плотности  $H$ . Кривая 1 —  $L=0.2H$ ; 2 —  $L=0.5H$ ; 3 —  $L=H$ ; 4 —  $L=2H$ ; 5 —  $L=5H$ . Штриховые линии показывают значения периода акустической отсечки (нижняя) и периода Брента-Вайсяля (верхняя).

Уменьшение периода отсечки волн в сильно расходящихся трубках в холодной плазме может ограничивать поток волн с периодами больше периода отсечки, а также быть ответственным за появление в короне колебаний соответствующих периодов при импульсном возбуждении корональной плазмы (рис. 20).

### **Публикации:**

Afanasyev A.N., Nakariakov V.M. Cut-off period for slow magnetoacoustic waves in coronal plasma structures // Astronomy & Astrophysics. 2015. V. 582. P. A57.

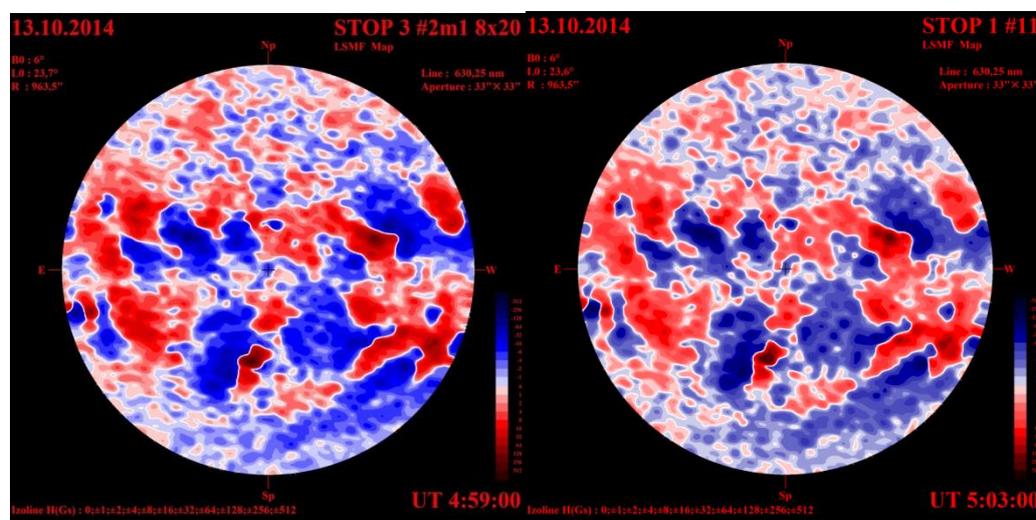
## **2.22 Введена в опытную эксплуатацию национальная сеть Солнечных телескопов оперативных прогнозов (СТОП) нового поколения**

Три телескопа СТОП разработаны и изготовлены ИСЗФ СО РАН и Институтом автоматизации и электрометрии СО РАН и установлены в трех обсерваториях России (Уссурийск, Иркутск, Кисловодск). Телескопы предназначены для получения ежедневных данных о крупномасштабных магнитных полях на диске Солнца (рис. 21).

Информативность и точность измерений напряженности магнитного поля являются лучшими для подобных систем в мире. Первые регулярные наблюдения позволили зарегистрировать переполюсовку магнитного поля Солнца, завершившуюся в сентябре 2014 года, показали хорошие возможности прогнозирования на основании магнитограмм параметров межпланетной среды, в частности, скорости солнечного ветра.

Телескопы являются частью воссоздаваемой национальной Службы Солнца, предназначенной для непрерывных наблюдений и анализа солнечной активности, прогноза космической погоды и оценки влияния солнечной активности на солнечно-земные связи. Это позволит проводить комплексные регулярные наблюдения солнечной активности на всех высотах солнечной атмосферы от фотосферы до солнечной короны. Данные сети Службы Солнца

являются критически важными для освоения космического пространства, систем навигации, дальней и мобильной радиосвязи, безопасности распределенных технологических систем и других технологий.



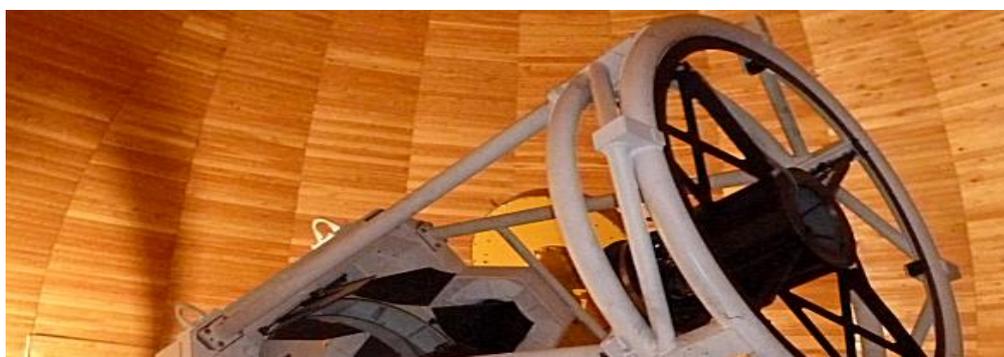
**Рис. 21.** Пример карт магнитных полей Солнца за 13 октября 2014г., измеренных почти одновременно. На левой панели показана магнитограмма, полученная в Кисловодске на Горной астрономической станции Главной астрономической обсерватории (ГАС ГАО РАН), на правой панели — магнитограмма, полученная в Байкальской астрофизической обсерватории (БАО ИСЗФ СО РАН).

#### Публикации:

1. Tlatov A.G., Dormidontov D.V., Kirpichev R.V., Pashchenko M.P., Shramko A.D., Peshcherov V.S., Grigoryev V.M., Demidov M.L., Svidskii, P.M. Study of some characteristics of large-scale solar magnetic fields during the global field polarity reversal according to observations at the telescope-magnetograph Kislovodsk Observatory // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015. V.55, № 7, P. 969-975.
2. Тлатов А.Г., Пащенко М.П., Понявин Д.И., Свидский П.М., Пещеров В.С., Демидов М.Л. Прогноз параметров солнечного ветра по данным наблюдений магнитографа СТОП // *Геомagnetизм и аэрoномия / Geomagnetism and Aeronomy*. 2016.Т.56, №8.

## 2.22 Введен в опытную эксплуатацию новый уникальный инструмент – широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ

В Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН введен в опытную эксплуатацию первый в России широкоугольный телескоп АЗТ-33 ВМ скоростного обзора неба с высокой проникающей способностью для решения фундаментальных проблем строения Вселенной, практических задач контроля околоземного космического пространства, информационного обеспечения функционирования группировок космических аппаратов, техногенного засорения космического пространства и задач астероидно-кометной опасности. С вводом АЗТ-33ВМ в Саянской обсерватории сформировался уникальный астрокомплекс, состоящий из двух близких по параметрам телескопов (инфракрасный телескоп АЗТ-33ИК был введен в эксплуатацию несколькими годами ранее), позволяющий решать важные научные и прикладные задачи (рис. 22). В частности, на обоих телескопах астрокомплекса в 2014-2015 гг. получены пробные наблюдения космического аппарата, находящегося в окрестности точки L2 системы Солнце-Земля. В качестве объекта наблюдения был выбран КА «Gaia» (международный номер 39479, расстояние от КА до пункта наблюдения 1.5 млн. км). Видимый блеск за всё время наблюдений не превысил 20.7 звёздной величины, изменялся в диапазоне от 20.7 до 22 звёздной величины.



**Рис. 22.** На верхней панели представлен общий вид Астрокомплекса Саянской обсерватории. Слева - башня телескопа АЗТ-33 ИК, справа - башня телескопа АЗТ-33ВМ, между ними - технический корпус с центром управления телескопами. На нижней панели показан недавно созданный телескоп АЗТ-33ВМ, введенный в эксплуатацию в конце 2015 г. Диаметр главного зеркала телескопа составляет 1.6 м, фокусное расстояние — 5.6 м, поле зрения 3 на 3 градуса.

#### **Публикации:**

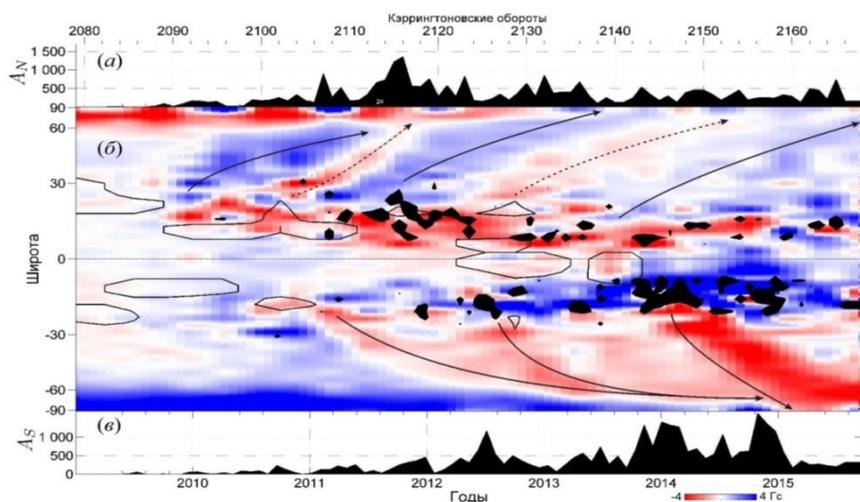
1. И.В. Коробцев, В.Е. Горяшин, М.В. Еселевич, Результаты сопровождения космического аппарата в окрестности точки либрации L2 системы Солнце – Земля // *Астрономический журнал*, 2016, (в печати).
2. Kiehlmann S., Savolainen T., Jorstad S. G., Sokolovsky K. V., Schinzel F. K., Marscher A. P., Larionov 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 // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. Volume 590. id.A10. pp. 1-20. DOI: 10.1051/0004-6361/201527725.

## **2.23 Обнаружено обращение полярных магнитных полей Солнца в текущем цикле активности**

Установлено, что причина асинхронности обращения полярных магнитных полей Солнца связана с северо-южной асимметрией его магнитной активности (рис. 23 а,в).

Широтно-временной анализ показывает развитие активности в цикле и обращение полярных магнитных полей (рис. б). Униполярные магнитные области (УМО) хвостовых полярностей формируются после распада активных областей с положительными углами наклона к экватору (ведущие пятна ближе к экватору, чем хвостовые). Выполненный анализ показал, что УМО ведущих полярностей возникали после распада групп пятен с отрицательными углами наклона к экватору.



**Рис. 23.** Изменения площадей солнечных пятен в северном (а) и южном (в) полушариях Солнца, (б) – широтно-временная диаграмма фотосферных магнитных полей (сине-красные тона) и области пятнообразования (черная заливка). Сплошные и пунктирные стрелки указывают УМО хвостовых и ведущих полярностей. Контурами указаны области, в которых преобладают отрицательные углы наклона групп пятен.

#### Публикации:

Mordvinov A.V., Grigoryev V.M., Erofeev D.V. Evolution of sunspot activity and inversion of the Sun's polar magnetic field in the current cycle // *Advances in Space Research* 2015. V. 55. P. 2739.

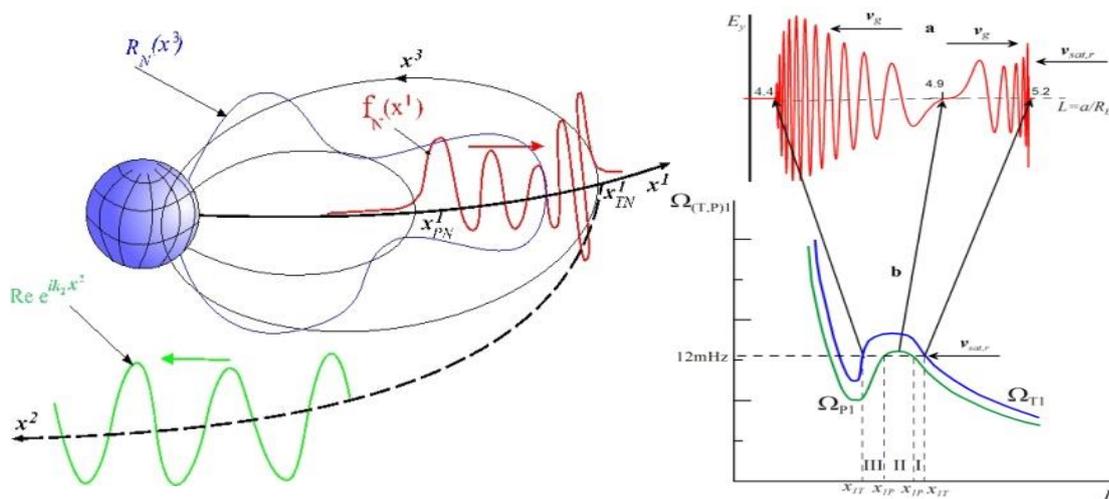
## 2.24 Экспериментальное подтверждение существования в магнитосфере Земли поперечно-мелкомасштабных альфвеновских волн с пространственно-зависимой поляризацией

Впервые по наблюдениям на одном из спутников миссии Van Allen Probes (RBSP-A) удалось обнаружить монохроматические альфвеновские волны со сложной поляризацией, зависящей от положения занимаемой ими магнитной оболочки.

Волны с такой поляризацией были более двадцати лет назад впервые предсказаны в теоретической работе. В то время не существовало космических аппаратов, подходящих для наблюдения таких колебаний. Только сейчас

появились многоспутниковые системы, способные проводить наблюдения колебаний магнитосферы с высоким пространственным разрешением.

В соответствии с теоретическими представлениями, эти колебания в области генерации представляют собой полоидальные стоячие альфвеновские волны. Колебания плазмы и магнитного поля в этих волнах происходят в плоскости магнитного меридиана. Полоидальные альфвеновские волны убегают из области генерации поперек магнитных оболочек, оставаясь стоячими волнами вдоль силовых линий магнитного поля. При удалении от области генерации стоячие альфвеновские волны постепенно трансформируются из полоидальных в тороидальные. В тороидальных альфвеновских волнах колебания плазмы и магнитного поля перпендикулярны плоскости магнитного меридиана (и, следовательно, перпендикулярны к направлению колебаний в области генерации) (рис. 24, слева). При достижении резонансной магнитной оболочки тороидальные альфвеновские волны полностью поглощаются из-за их диссипации в проводящем слое ионосферы.



**Рис.24.** (слева): Теоретически предсказанная структура монохроматической азимутально-мелкомасштабной альфвеновской волны в дипольной магнитосфере.

(справа): (a) Структура колебаний альфвеновского типа, зарегистрированных спутником RBSP-A при пересечении им плазмопаузы 23 октября 2012г., (b) - их привязка к структуре собственных частот

основной гармонике полоидальных ( $\Omega_{P1}$ ) и тороидальных ( $\Omega_{T1}$ ) стоячих альфвеновских волн (L-параметр магнитной оболочки).

Именно такие колебания были впервые зарегистрированы спутником RBSP-A. Исходя из структуры зарегистрированных колебаний, сделан вывод, что спутник пересек две области существования таких колебаний, локализованных вблизи плазмопаузы (рис. 24 (справа), панели (a) и (b)). Движение спутника по траектории было таким, что он вначале пересек внешнюю (по отношению к плазмопаузе) резонансную магнитную оболочку для тороидальных альфвеновских волн. Здесь волны имели тороидальную поляризацию. Затем он сместился в область генерации колебаний, расположенную на плазмопаузе. При этом поляризация регистрируемых монохроматических (с частотой около 12 мГц) колебаний непрерывно изменялась от тороидальной до полоидальной. Затем картина изменения поляризации регистрируемых колебаний повторилась в обратном порядке. По мере того, как спутник смещался из области генерации к внутренней тороидальной резонансной оболочке, поляризация колебаний постепенно трансформировалась из полоидальной в тороидальную. Это полностью совпало с теоретическим предсказанием поведения поперечно-мелкомасштабных альфвеновских волн, что и дало основание считать это первым экспериментальным подтверждением существования таких волн в магнитосфере Земли.

#### **Публикации:**

1. Leonovich A.S., Klimushkin D.Yu., Mager P.N. « Experimental evidence for existence of monochromatic transverse small-scale standing Alfvén waves with spatially depending polarization », J. Geophys. Res., Space Physics, V. 120, pp. 5443–5454, doi:10.1002/2015JA021044, 2015.

2. Leonovich, A. S., and V. A. Mazur (1993), A theory of transverse small-scale standing Alfvén waves in an axially symmetric magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, 41, 697-717, doi:10.1016/0032-0633(93)90055-7.

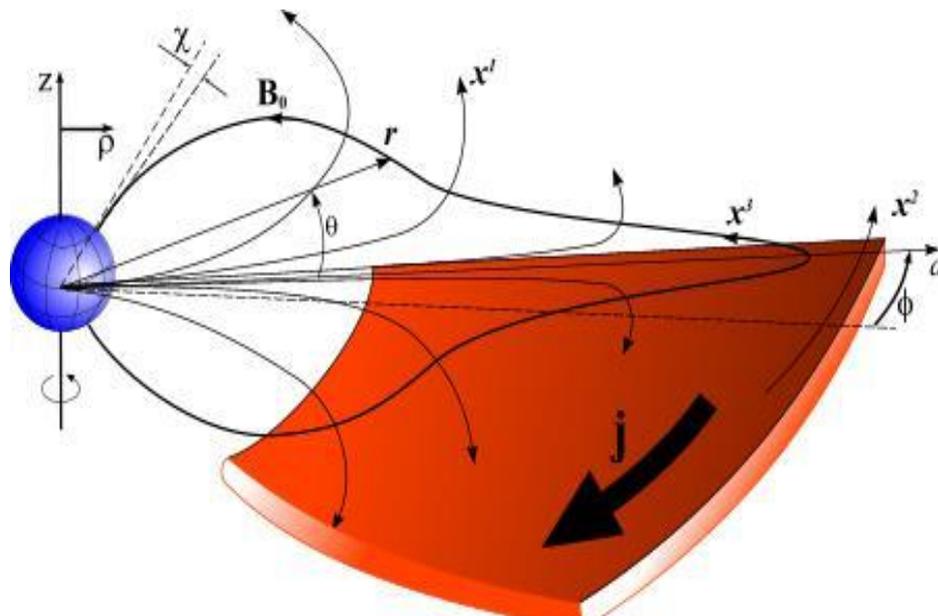
## **2.25 Сцепленные альфвеновские и ММЗ-волны в геомагнитном хвосте**

Теоретически показано, что на вытянутых в хвост силовых линиях геомагнитного поля, проходящих через токовый слой, формируется сложная мода МГД-колебаний, состоящая из альфвеновской и медленной магнитозвуковой волн. Зацепление этих волн происходит в узком токовом слое геомагнитного хвоста.

Вдоль магнитной силовой линии эта «сцепленная» мода колебаний имеет вид стоячей волны между точками пересечения силовой линии с ионосферой в северном и южном полушариях (рис. 25). В направлении поперек магнитных оболочек сцепленная мода имеет вид волны, бегущей от области ее генерации до резонансной поверхности, где происходит полное ее поглощение в ионосфере.

Наиболее интересной особенностью этой моды колебаний является то, что при состоянии геомагнитного хвоста, соответствующем подготовительной стадии суббури (хвост вытянут, токовый слой тонкий) сцепленные моды колебаний становятся неустойчивыми. Эту («баллонную») неустойчивость сцепленных мод, наряду с тиринг-неустойчивостью токового слоя, рассматривают в качестве причины суббурного взрыва, вызывающей пересоединение силовых линий геомагнитного поля в геомагнитном хвосте.

В рассматриваемой работе впервые исследована полная пространственная структура сцепленных мод МГД-колебаний геомагнитного хвоста в аксиально-симметричной модели магнитосферы (рис. 2), спектр частот собственных колебаний и инкременты их неустойчивости. Обнаружены особенности этой структуры, которые могут быть использованы для обнаружения этих колебаний



с помощью многоспутниковых систем

**Рис. 25.** Аксиально-симметричная модель магнитосферы с токовым слоем. Показаны: 1) силовые линии магнитного поля, вытянутые в геомагнитный хвост; 2) угол магнитного наклона на ионосфере  $\chi$ ; 3) токовый слой с плотностью тока  $\mathbf{j}$ ; 4) системы координат, связанных с иловыми линиями, которые используются в расчетах ( $x^1, x^2, x^3$ ) – криволинейная ортогональная,  $(\rho, \phi, z)$  – цилиндрическая и  $(r, \phi, \vartheta)$  – сферическая.

наблюдения. В распределении амплитуды продольной компоненты магнитного поля колебаний вдоль силовой линии, в точках ее перегиба (две из которых расположены с двух разных сторон вблизи токового слоя) должны наблюдаться резкие пики. Оказалось, что наибольший инкремент неустойчивости колебаний имеет вторая продольная гармоника сцепленных волн.

## **Публикации:**

Leonovich, A.S. and Kozlov D.A. Coupled guided modes in the magnetotails: spatial structure and ballooning instability, *Astrophysics and Space Science*, 353, 9-23, 2014.

## **2.26 Первые результаты мультилучевого УНЧ-эксперимента с высоким разрешением на Екатеринбургском когерентном радаре декаметрового диапазона: ионосферные признаки сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод**

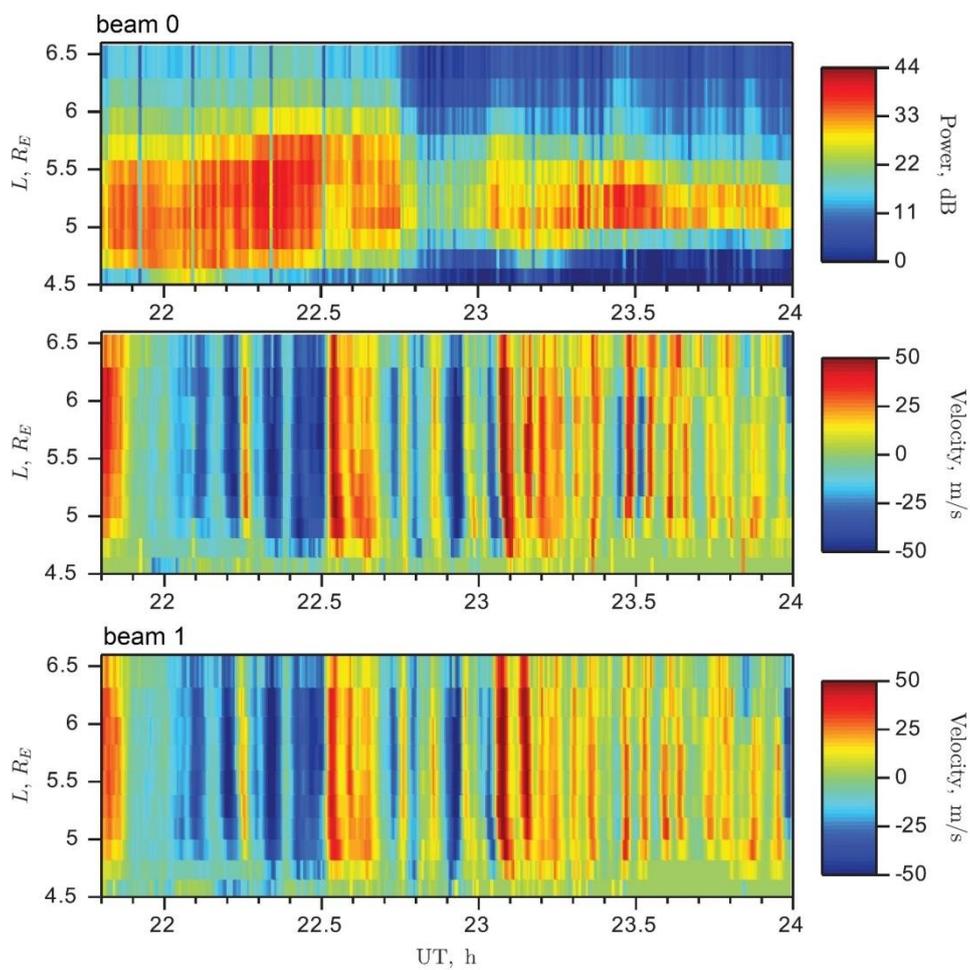
Ультра-низкочастотные (УНЧ) волны часто наблюдаются в областях магнитосферы с высоким давлением плазмы, где отношение давления плазмы к магнитному давлению превышает единицу. Такими областями являются ночная магнитосфера за пределами холодной плазмосферы и геомагнитный хвост. Двумя наиболее распространенными модами колебаний в такой плазме являются альфвеновская волна и дрейфовая компрессионная мода, сцепленные друг с другом за счет кривизны силовых линий магнитного поля Земли. Широкие возможности для их экспериментального исследования предоставляются декаметровыми когерентными радарными системами SuperDARN.

На Екатеринбургском когерентном радаре декаметрового диапазона (построенном по схеме, аналогичной стандартным радарам SuperDARN) с декабря 2013 г. проводится продолжающийся эксперимент по исследованию пространственно-временных характеристик УНЧ-волн. Исследование этих волн базируется на анализе доплеровского сдвига при отражении радиоволн от F-слоя ионосферы. Во время эксперимента один из каналов радара сканировал лучи 0-2, со временем усреднения 6 секунд, соответствующая общему 18-секундному разрешению по каждому лучу. Это позволяет детектировать УНЧ-

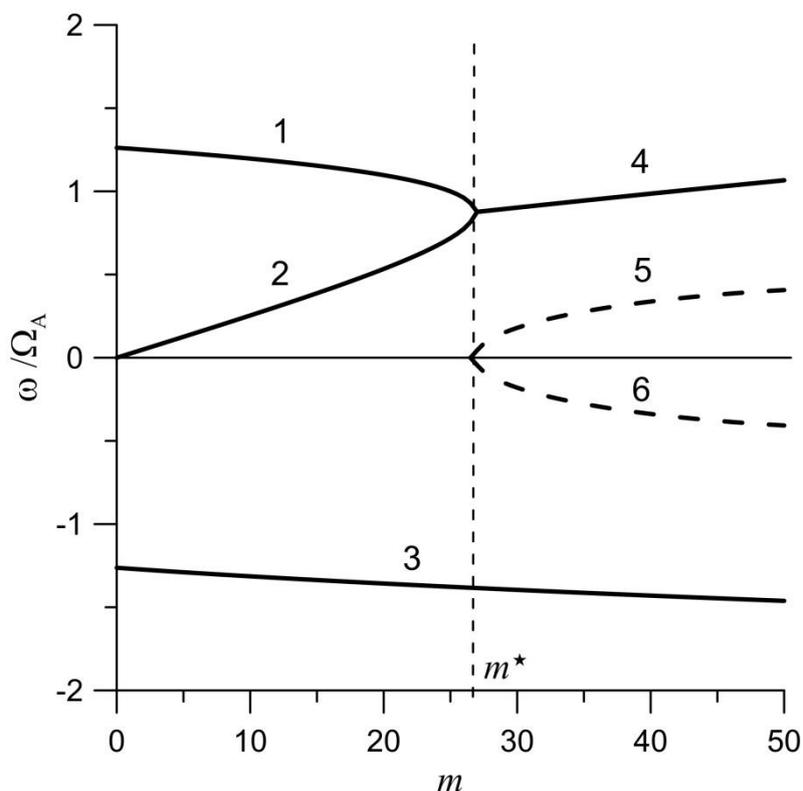
волны с периодами 40 секунд и более. Луч 0 направлен практически точно вдоль магнитного меридиана, благодаря чему регистрируемая скорость колебаний соответствует азимутальной компоненте электрического поля.

Первые примеры УНЧ-волн типа Pc5, зафиксированных в ходе этого эксперимента, наблюдались 14 декабря 2013 г. и 2 января 2014 г. в ночной части магнитосферы в ходе двух малых магнитных бурь, связанных с потоками быстрого солнечного ветра из корональных дыр (рис. 26). В обоих случаях УНЧ-волны имели место после авроральных возмущений суббуревого типа.

Наблюдалось две ветви колебаний, с более высокими и более низкими частотами. На обеих ветвях частота зависела от азимутального волнового числа  $m$ . С увеличением  $m$  ветви сближались друг с другом, и при достижении некоторого критического значения  $m^*$  сливались воедино. Такая зависимость частоты от азимутального волнового числа характерна для сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод в плазме конечного давления в кривом магнитном поле, согласно теории, разработанной сотрудниками ИСЗФ ранее (Klimushkin et al., 2012). Единая ветвь колебаний при  $m > m^*$  представляет собой неустойчивую УНЧ-моду – баллонную дрейфовую моду (рис. 27).



**Рис.26.** УНЧ-осцилляции в скорости дрейфа плазмы, зафиксированные на Екатеринбургском радаре российского сегмента SuperDARN 14 декабря 2013 г. По горизонтальной оси – всемирное время, по вертикальной – параметр Мак-Илвейна  $L$ . Сверху вниз: мощность отраженного сигнала на луче 0, скорость колебания плазмы в волне на лучах 0 и 1.



**Рис.27.** Зависимость частоты сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод в плазме конечного давления в кривом магнитном поле. При  $m > m^*$  происходит слияние ветвей с образованием баллонной дрейфовой моды. Цифрами отмечены моды колебаний: 1 – альфвеновская, распространяющаяся в западном направлении, 2 – дрейфово-компрессионная, 3 – альфвеновская, распространяющаяся в восточном направлении, 4 – баллонная дрейфовая (реальная часть частоты), 5 и 6 – баллонная дрейфовая (мнимая часть частоты).

Таким образом, предлагается следующая интерпретация УНЧ-волн, зафиксированных в ходе эксперимента на Екатеринбургском радаре: более высокочастотная ветвь колебаний (при докритических значениях азимутального волнового числа:  $m < m^*$ ) ассоциируется с альфвеновской модой, более низкочастотная – с дрейфово-компрессионной модой, единая ветвь, возникшая при  $m > m^*$  – с баллонной дрейфовой модой. Такого рода трансформация различных видов УНЧ мод ранее не наблюдалась.

### **Публикации:**

1. Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Pilipenko V.A., On the ballooning instability of the coupled Alfvén and drift compressional modes, *Earth Planets Space*, 64, 777–781, doi:10.5047/eps.2012.04.002, 2012.
2. Mager P.N., Bergardt O. I., Klimushkin D.Yu., Zolotukhina N.A., Mager O.V. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 130-131, p. 112-126, doi:10.1016/j.jastp.2015.05.017, 2015.

### **2.27 Исследование механизмов генерации крупномасштабных и средне-масштабных неоднородностей в зимней стратосфере северного полушария и их влияния на вариации параметров ионосферы**

На основе данных ре-анализа ECMWF Era Interim и теоретических оценок установлено, что основным источником генерации крупномасштабных и среднемасштабных неоднородностей зимней стратосферы является бароклинная неустойчивость регулярного течения воздуха от теплого экватора к холодному полюсу. В результате неустойчивости поток формируется в виде небольшого числа струйных течений (рис. 28), которые под действием силы Кориолиса отклоняются к востоку и формируют спиралевидное циркумполярное течение, обеспечивающее нисходящую циркуляцию Бревера-Добсона в стратосфере.

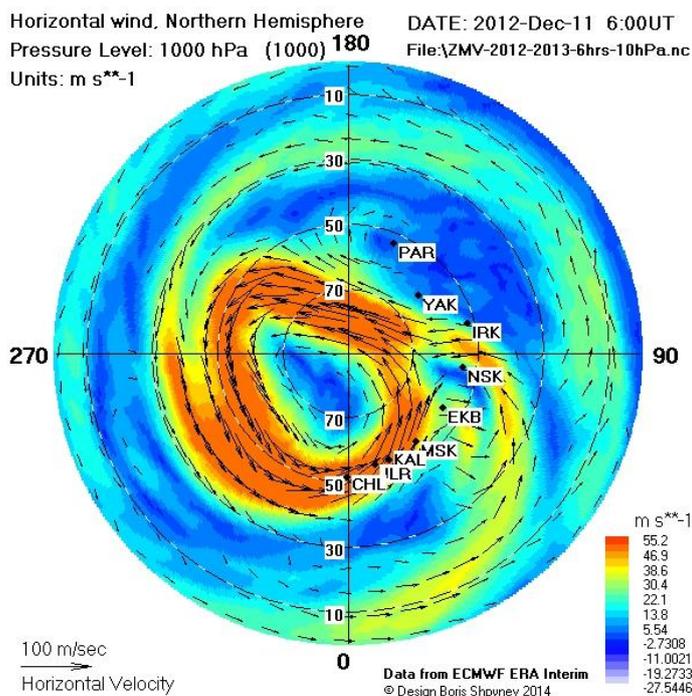
Сдвиговая неустойчивость самого струйного течения является источником среднemasштабных внутренних гравитационных волн (ВГВ) (рис. 29), которые при определенных условиях могут распространяться вверх в мезосферу и нижнюю термосферу. Установлено, что причиной высокой вариабельности параметров зимней среднеширотной ионосферы являются среднemasштабные ВГВ (рис. 29), генерируемые сдвиговой неустойчивостью стратосферного струйного течения.

При увеличении вертикальной скорости струйного течения до величины 0.5-1м/с происходит генерация акустико-гравитационных волн (АГВ) (рис. 30), которые являются источником турбулентного перемешивания и нагрева воздуха. Этот процесс регистрируется, как внезапное стратосферное потепление (ВСП).

На основе кооперации экспериментальных научных групп России и Европы организована среднеширотная цепь ионозондов вертикального зондирования, практически полностью охватывающая Евразийский континент вдоль  $\sim 55^\circ\text{CШ}$  (рис. 28 и 31). По совместному анализу данных цепи ионозондов впервые были обнаружены резкие долготные вариации параметров ионосферы над активными зонами стратосферных струйных течений, связанные с вертикальным переносом молекулярного газа в нижней термосфере. Наибольшие локальные вариации ионосферных параметров наблюдаются при перестройке стратосферной циркуляции во время внезапных стратосферных потеплений (рис. 31).

Над струйным течением, над антициклоном и над зоной столкновения стратосферного циклона и антициклона наблюдается уменьшение электронной концентрации в ионосфере вследствие подъема молекулярного газа и уменьшения соотношения  $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ . Над зоной циклонической циркуляции молекулярный газ опускается из нижней термосферы и электронная концентрация ионосферной плазмы возрастает. Отличие критических частот

ионосферы над разными областями струйного течения может составлять 1-1.5МГц.

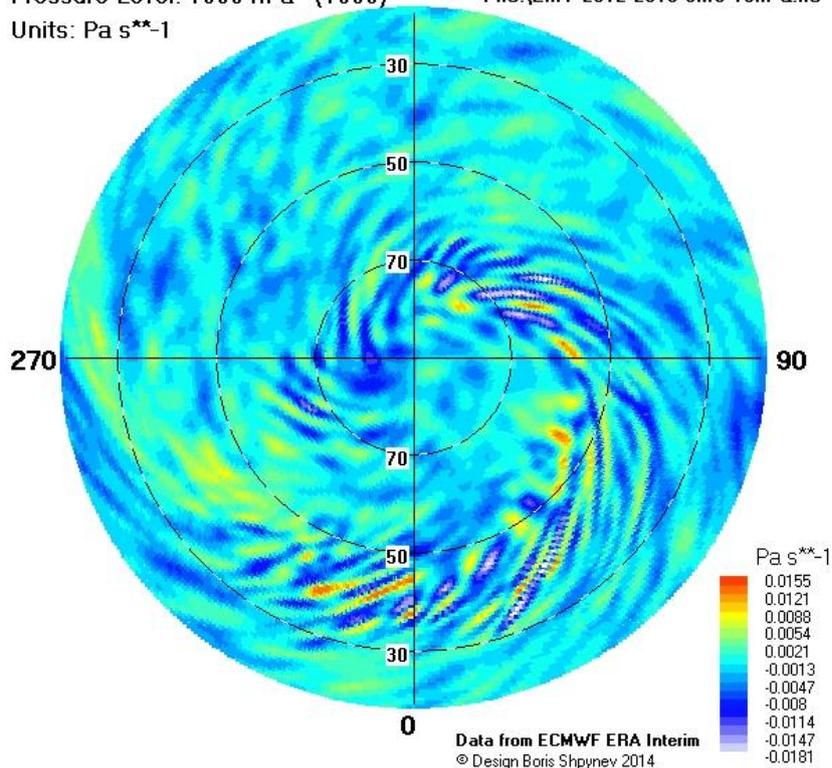


**Рис. 28.** Горизонтальная скорость ветра на высоте 30км для северного полушария 11 декабря 2012г.

В результате бароклинной неустойчивости поток теплого воздуха от экватора к полюсу в зимней стратосфере формируется в виде небольшого числа струйных течений, образующих в полярной области циркумполярный вихрь, в котором остывающий стратосферный воздух опускается по спиральной траектории в тропосферу. Над разными частями струйного течения формируются крупномасштабные вертикальные потоки, меняющие соотношение  $[O]/[N_2]$  и электронную концентрацию в нижней ионосфере. По данным цепи среднеширотных ионозондов критическая частота ионосферы над разными зонами циркуляции может отличаться до 1.5МГц.

Vertical velocity, Northern Hemisphere  
Pressure Level: 1000 hPa (1000) **180**  
Units: Pa s<sup>-1</sup>

DATE: 2012-Dec-20 6:00UT  
File:\ZMV-2012-2013-6hrs-10hPa.nc

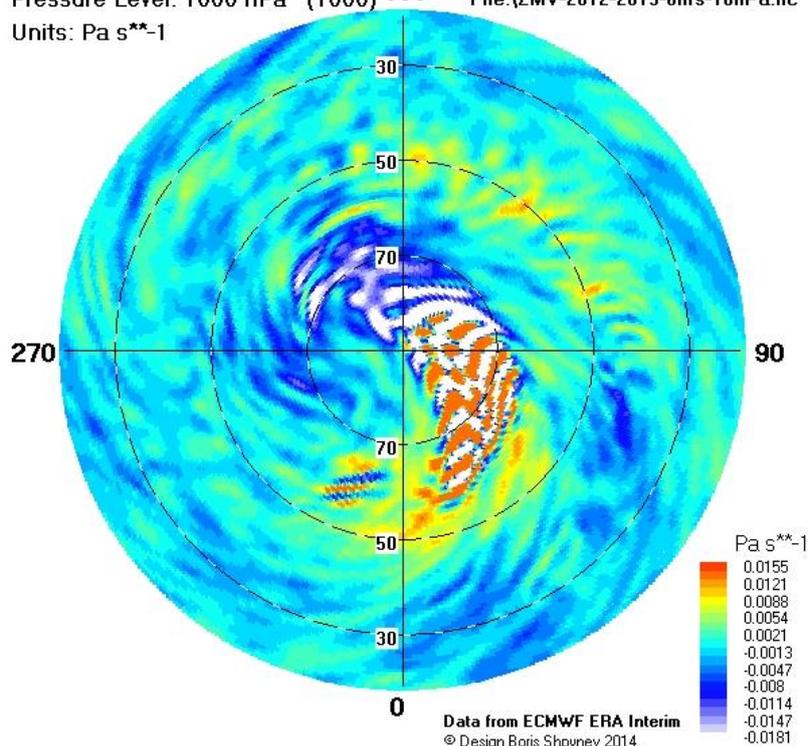


**Рис. 29.** Пример поля вертикальной компоненты скорости ветра на высоте ~30км для северного полушария 20 декабря 2012г.

Сдвиговая неустойчивость спиралевидного струйного течения является источником внутренних гравитационных волн (ВГВ), распространяющихся вверх по потоку. Эти ВГВ являются основным источником среднемасштабных возмущений, наблюдаемых в зимней ионосфере.

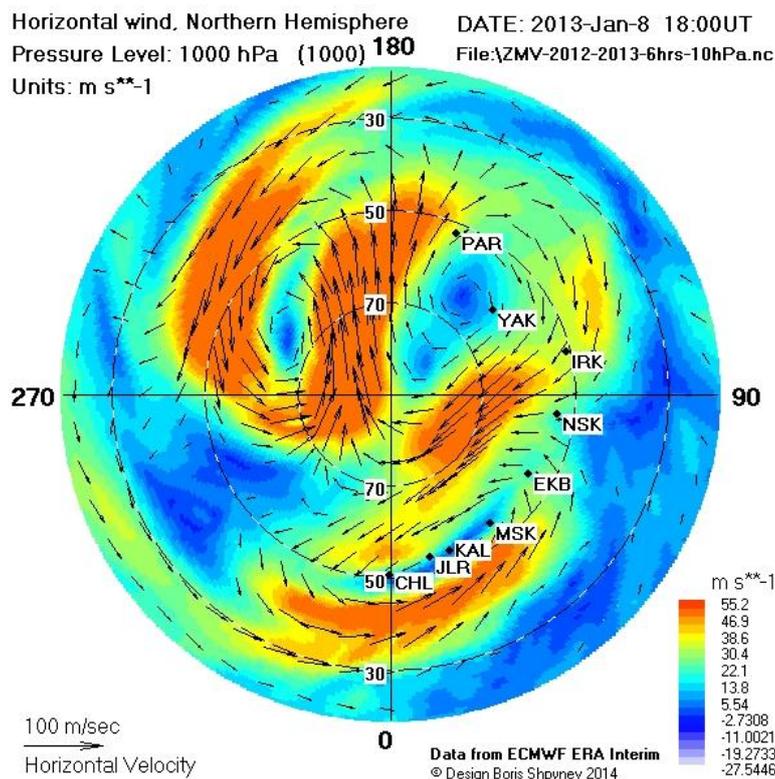
Vertical velocity, Northern Hemisphere  
Pressure Level: 1000 hPa (1000) **180**  
Units: Pa s<sup>-1</sup>

DATE: 2013-Jan-4 12:00UT  
File:\ZMV-2012-2013-6hrs-10hPa.nc



**Рис.30.** Поле вертикальной скорости на 30км для 4 января 2013г.

При усилении вертикальной скорости опускающегося стратосферного струйного течения до 0.5-1м/с, на границе потоков сдвиговая неустойчивость генерирует мелкомасштабные акустико-гравитационные волны, преобразующие энергию потока в тепло, что регистрируется как внезапное стратосферное потепление (ВСП).



**Рис.31.** Горизонтальная скорость ветра 8 января 2013г.

Финальной частью развития стратосферной циркуляции во время ВСП является разделение циркумполярного вихря на пары циклонов и антициклонов. В ионосфере над циклонами наблюдается уменьшение высоты ионосферы и увеличение критической частоты. Над антициклоном и над зоной столкновения циклона с антициклоном ионосфера поднимается, и критическая частота ионосферы уменьшается.

**Публикации:**

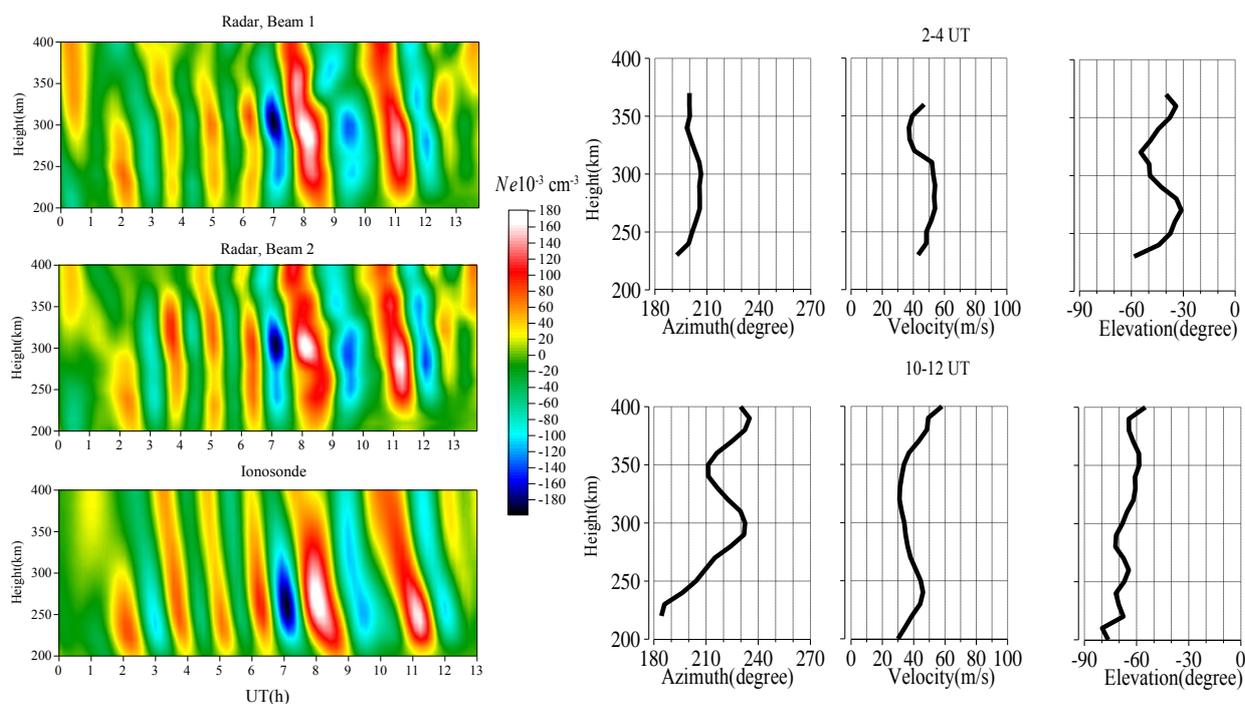
1. Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P.. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming / Earth, Planets and Space 2015, 67:18 (11 February 2015) doi:10.1186/s40623-015-0187-1.

2. Shpynev, B. G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet stream in-stabilities in winter polar stratosphere/mesosphere, // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (2015), pp. 201-215 DOI:10.1016/j.jastp.2015.07.005.
3. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (2015), pp. 235-243 DOI:10.1016/j.jastp.2015.07.006.

## **2.28 Экспериментальное исследование проявления внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере Земли**

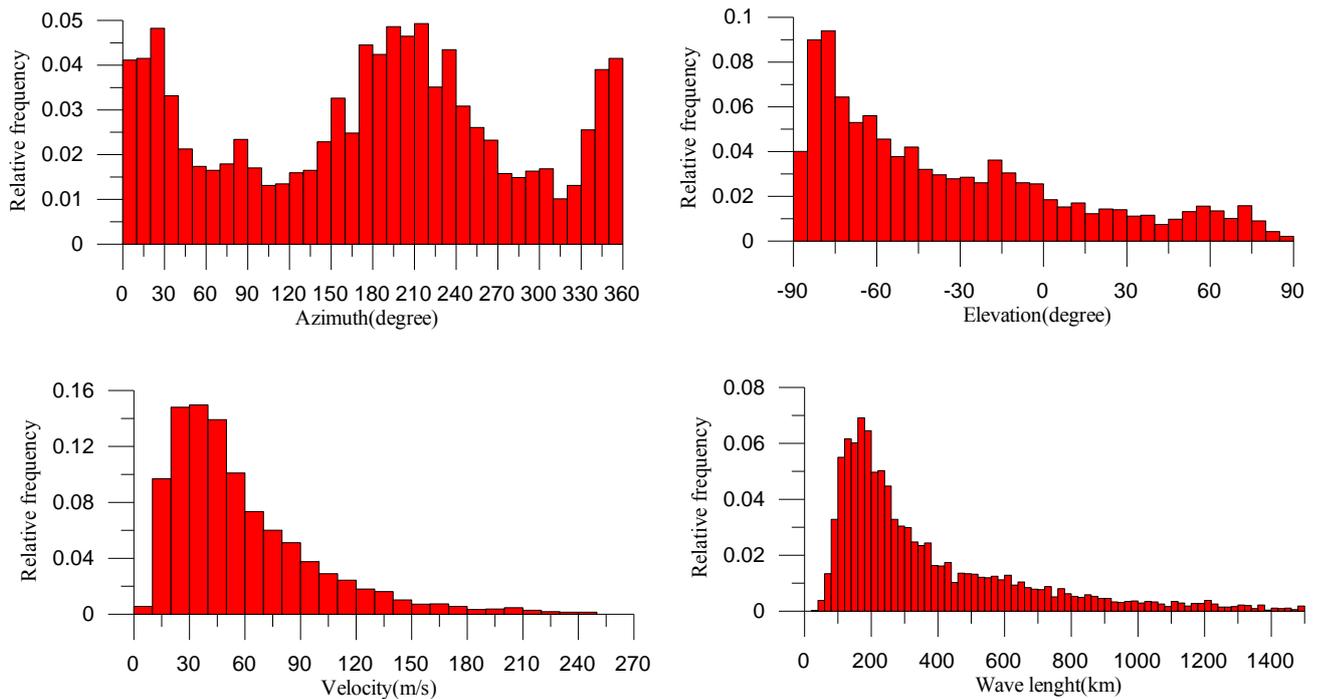
Исследования волновых возмущений в верхней атмосфере Земли проводятся на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР). Существенным преимуществом ИРНР перед другими радарными подобными типами является возможность быстрого электронного сканирования пространства, позволяющая практически одновременно получать высотные профили электронной концентрации ( $N_e(h)$ ) в различных направлениях.

Разработан метод кросскорреляционного анализа возмущений  $N_e(h)$  в различных направлениях, позволяющий восстанавливать трехмерную пространственно-временную картину неоднородностей с определением полного вектора скорости их перемещения. На рис. 9 показаны возмущения  $N_e(h)$  на трех независимых лучах и характеристики скорости распространения ПИВ (азимут, модуль скорости и угол наклона к горизонту).



**Рис. 9.** Возмущения электронной концентрации на трех независимых лучах и характеристики скорости распространения ПИВ.

Для анализа длинных рядов данных **впервые** создан автоматизированный метод анализа трехмерных пространственно-временных неоднородностей. Получена представительная статистика характеристик распространения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с периодами от 1 до 6 часов в верхней атмосфере (рис. 10). Установлено, что преобладающими являются направления распространения ПИВ с севера на юг и с юга на север. Максимум распределения в модуле скорости ПИВ приходится на диапазон ~25-50 м/с. Максимум в распределении длин волн приходится на диапазон 150-200 км. Около 75% возмущений имеют отрицательный угол наклона волнового фронта к горизонту.



**Рис. 10.** Статистические распределения характеристик ПИВ.

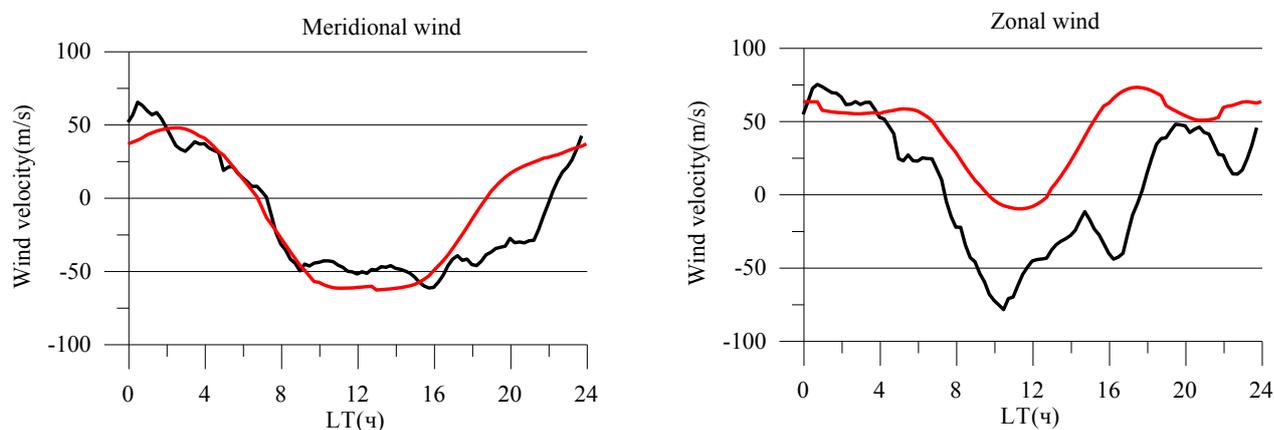
На основе данных о полном трехмерном векторе скорости ПИВ осуществлена проверка характеристик ПИВ на соответствие их известному дисперсионному соотношению Хайнса для внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере (рис. 11). Моделирование показало, что при учете возможного влияния нейтрального ветра более 70 % наблюдаемых ПИВ соответствуют представлениям законах распространения ВГВ в верхней атмосфере.

На основе анализа трехмерных характеристик наблюдаемых ВГВ **впервые** предложен метод определения усредненного суточного хода зонального и меридионального ветра, в котором величины компонент ветра в определенный момент суток  $t$  определяются как минимум функционала

$$\sum (U_x \sin(\varphi_i) + U_y \cos(\varphi_i) - U_i)^2 \rightarrow \min ,$$

где  $U_x$  – зональный ветер,  $U_y$  – меридиональный ветер,  $U_i$  – горизонтальный ветер вдоль направления распространения ВГВ,  $\varphi_i$  – азимут. На рис. 12 показаны параметры ветра на высотах наблюдения ВГВ (220-250 км) для

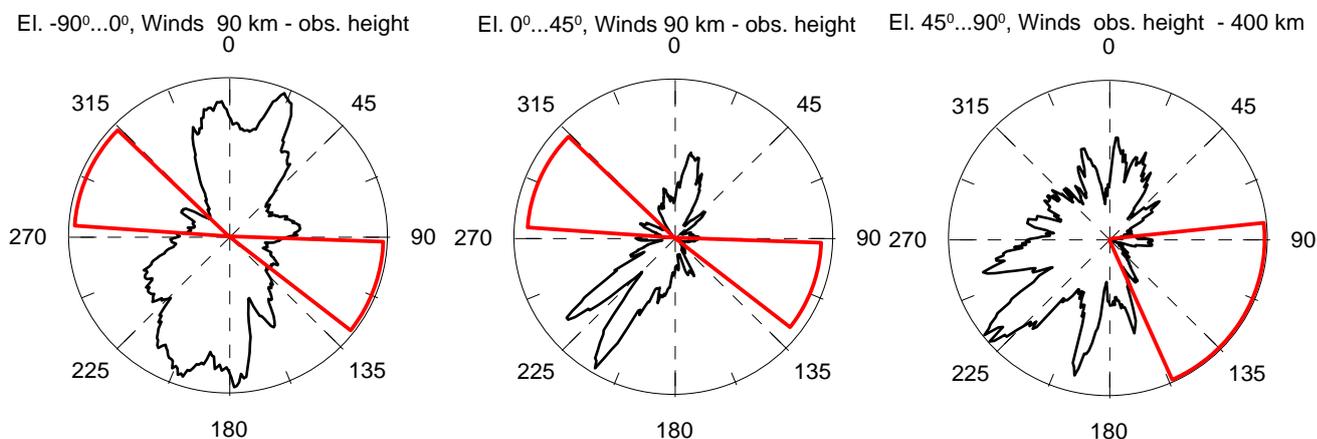
зимнего сезона. Красная линия соответствует прогнозу модели HWM2007, чёрной линией показаны результаты, полученные с помощью разработанного метода, положительная меридиональная скорость ветра направлена на юг, положительная зональная скорость ветра направлена на восток.



**Рис. 12.** Среднемесячный суточный ход меридионального (слева) и зонального (справа) ветра.

**Впервые** был проведен анализ распределения по азимутам ВГВ с различными углами наклона волнового фронта к горизонту. Большая часть наблюдаемых ВГВ имеет фазовую скорость направленную сверху вниз (отрицательный угол наклона волнового фронта), что соответствует волнам распространяющимся от источника, лежащего ниже области наблюдения. ВГВ с положительными углами наклона волнового фронта, составляют до 25% от всех наблюдений, и могут быть условно разделены на два диапазона:  $0^{\circ}$ - $45^{\circ}$ , природа которых связана с отражением первичных ВГВ на границе резкого изменения ветра, расположенной выше области наблюдения ( $\sim 15\%$ ) и  $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$  - волны источник которых очевидно расположен выше рассматриваемой области ( $\sim 10\%$ ). На рис. 13 показано азимутальное распределение для этих трех типов ВГВ. Красным цветом показаны сектора, где проекция скорости ветра,

рассчитанного по модели HWM2007, на направление распространения ВГВ составляет более 50 м/с. Предполагается, что такой должен препятствовать распространению ВГВ, т.е. должна происходить так называемая ветровая фильтрация.

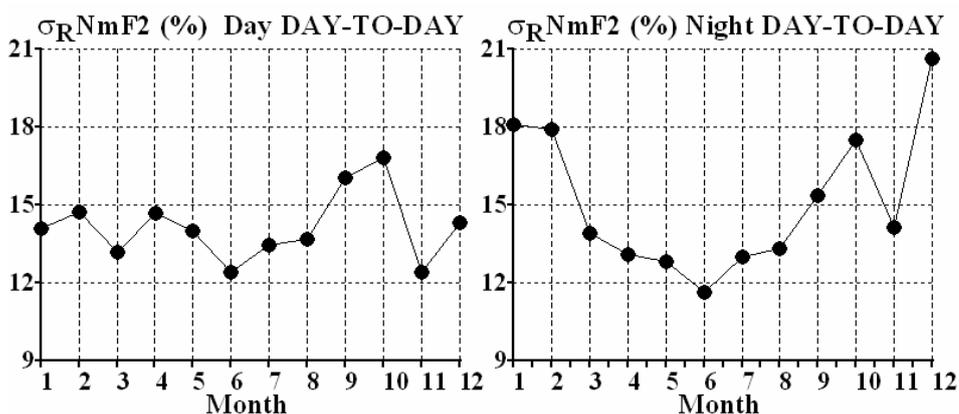
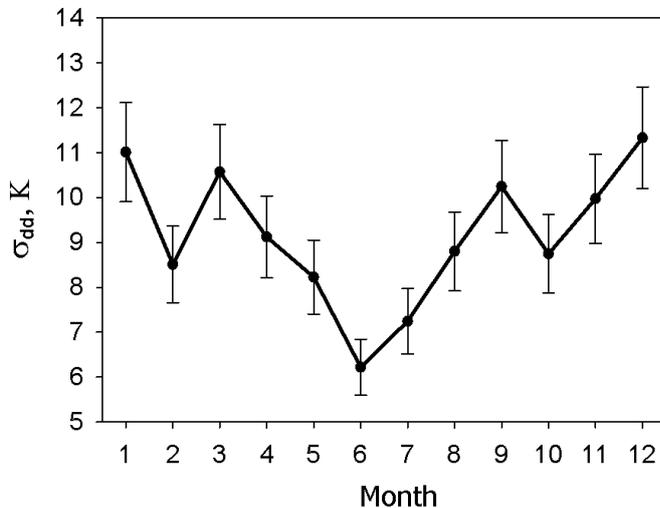


**Рис. 13.** Чёрным цветом показано распределение азимутов для ВГВ распространяющимся от источника, лежащего ниже области наблюдения (слева), для ВГВ распространяющимся от источника, лежащего ниже области наблюдения, и отраженных на границе резкого изменения ветра (в центре) и для ВГВ распространяющимся от источника, лежащего выше области наблюдения. Красным цветом показаны сектора, где проекция скорости ветра на направление распространения ВГВ составляет более 50 м/с..

Разный путь трех типов ВГВ в верхней атмосфере обуславливает различную ветровую фильтрацию. Распределение азимутов для отражённых ВГВ повторяет распределение азимутов первичных волн, но является более узким, так как, во-первых, эти волны прошли двойную фильтрацию нейтральным ветром и, во-вторых, не для всех первичных волн были выполнены условия отражения. Распределение азимутов для ВГВ, имеющих источники выше рассматриваемой области является наиболее широким, так как эти волны имеют самый короткий путь до области их наблюдения.

## 2.29 Исследование изменчивости параметров нейтральной верхней атмосферы и ионосферы по данным спектрометрических измерений и радиозондирования

Разработана методика комплексного анализа атмосферной и ионосферной изменчивости, позволяющая получать информацию о динамической связи различных областей атмосферы. В качестве параметра атмосферной изменчивости для сопоставления с вариациями ионосферных параметров предложено использовать изменчивость температуры области мезопаузы, получаемую из спектрометрических измерений эмиссии молекулы гидроксила (высота максимума излучения  $\sim 87$  км). Межсуточные и внутрисуточные вариации температуры в области мезопаузы в основном обуславливается волновыми процессами – планетарными волнами, приливами и внутренними гравитационными волнами, поэтому сопоставление температурной изменчивости с изменчивостью ионосферных параметров позволяет количественно оценить проявления активности волн различных временных масштабов в вариациях параметров нейтральной верхней атмосферы и ионосферы.



**Рис. 37.** Верхняя панель: сезонный ход среднемесячных отклонений температуры области мезопаузы ( $\Delta_{dd}$ ) от ее годового хода. Нижняя панель: сезонные вариации межсуточной изменчивости максимума электронной концентрации  $N_mF2$  для дневных (слева) и ночных (справа) условий.

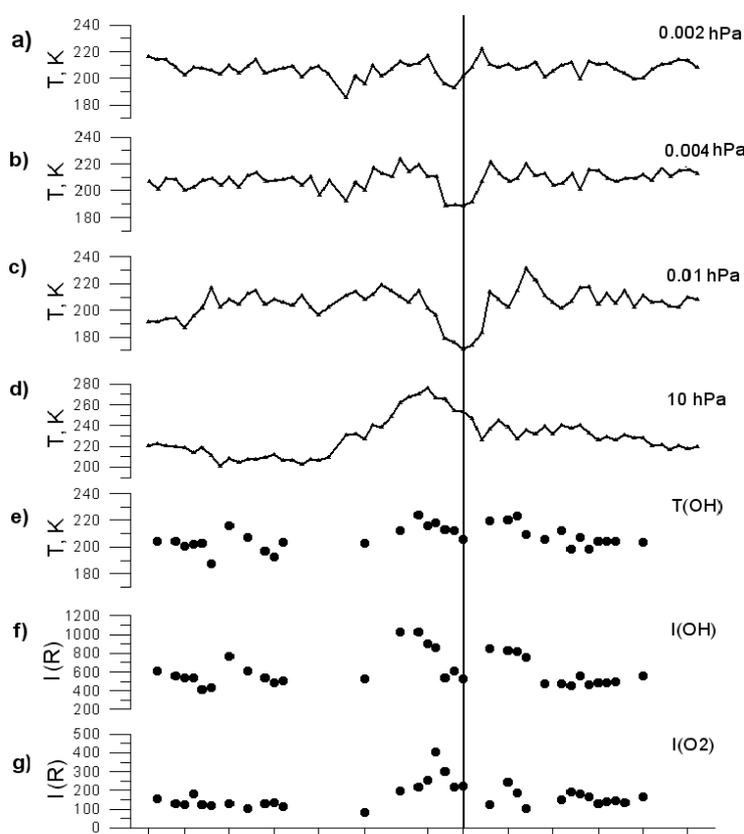
По многолетним данным спектрометрических измерений и вертикального радиозондирования, с использованием предложенной методики, проведено исследование сезонных вариаций изменчивости параметров нейтральной верхней атмосферы (температура области мезопаузы,  $T_m$ ) и ионосферы (максимум электронной концентрации,  $N_mF2$ ), вызванной проявлением активности волн различных временных масштабов. Выявлены сезонные зависимости вариативности исследуемых параметров (рис. 37). Сезонный ход межсуточной изменчивости  $T_m$  и  $N_mF2$  имеет схожий характер: максимальные значения наблюдаются в зимние месяцы и в периоды равноденствий, когда происходит сезонная перестройка атмосферной циркуляции. Этот факт может указывать на то, что планетарные волны, распространяющиеся из нижних слоев атмосферы, имеют значительное влияние как на температурный режим области мезопаузы, так и на поведение электронной концентрации в F2-области ионосферы.

#### **Публикации:**

Medvedeva, I., and K. Ratovsky (2015), Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, Issue 6, p. 5151–5159, doi:10.1002/2015JA021289.

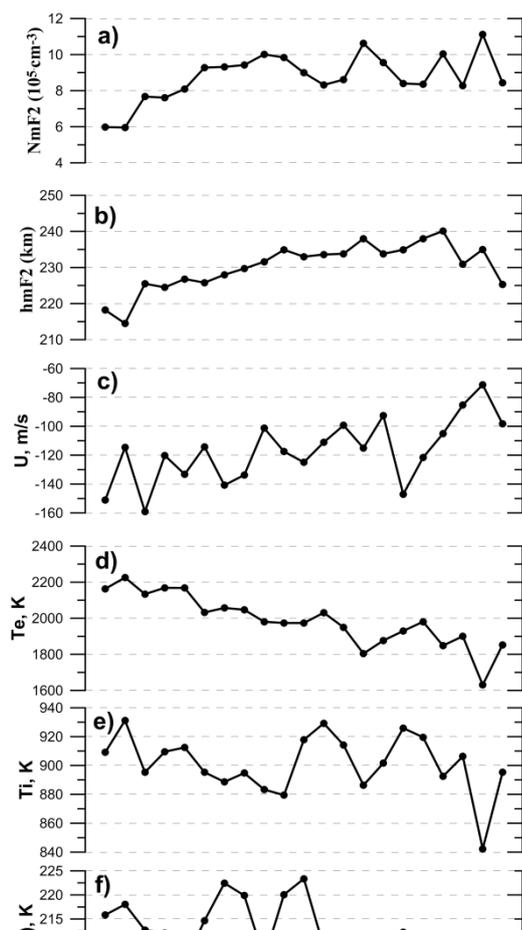
### **2.30 Комплексный анализ возмущений параметров нейтральной атмосферы и ионосферы в регионе Восточной Сибири в период действия внезапного стратосферного потепления в январе 2013 года**

Проведен комплексный анализ параметров нейтральной атмосферы и ионосферы по наземным спектрометрическим и радиофизическим данным координированных наблюдений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН, с привлечением спутниковых данных MLS Aura и данных систем реанализа, в период развития и действия внезапного зимнего стратосферного потепления (ВСП) в январе 2013 г. Стратосферное потепление в январе 2013 года относится к типу «major», оно сопровождалось сменой зональной циркуляции на 60N на уровне 10 гПа с западной на восточную, которая произошла 5-6 января, и разделением циркумполярного вихря.



**Рис. 38.** Вариации атмосферной температуры в области МНТ (а-с) и в стратосфере (d) по спутниковым данным MLS Aura, вариации вращательной температуры ОН (е) и интенсивностей эмиссий ОН (f) и O<sub>2</sub> (g) по наземным спектрометрическим данным, с 1 декабря 2012 г. по 31 января 2013 г. Вертикальная линия соответствует смене направления средней зональной циркуляции (60°N, 10hPa), начало значительного (“major”) всп.

Выявлены и проанализированы проявления ВСП в диапазоне высот от стратосферы до термосферы над регионом Восточной Сибири, который находился вблизи области наибольших связанных с ВСП аномалий температуры в средней стратосфере (рис. 38). В ходе развития ВСП повышение температуры стратосферы сопровождалось охлаждением мезосферы, наблюдавшемся в достаточно узком слое.



**Рис. 39.** Дневные значения ионосферных параметров в период 1-21 января 2013 г.:

a) максимум электронной концентрации ( $NmF2$ ); b) высота максимума электронной концентрации  $hmF2$ ; c) скорость меридионального нейтрального ветра, на высоте 266 км, «-» направление с юга на север; d) температура электронов на высоте 266 км; e) температура ионов на высоте 266 км; f) вращательная температура ОН (~87 км); g) вариации геомагнитной (сплошная линия) и солнечной (пунктир) активности.

Впервые получено экспериментальное подтверждение вызванного стратосферным потеплением усиления вертикального переноса основных атмосферных компонентов из нижележащих слоев атмосферы на высоты верхней атмосферы, в результате которого произошла значительная, в 2-2.5 раза, интенсификация эмиссий ОН и O<sub>2</sub>, возникающих в области МНТ (рис. 38 f-g), вследствие повышения концентрации кислорода на высотах свечения, и нарушение корреляции электронной концентрации и высоты максимума электронной концентрации F2-области ионосферы (рис. 39 a-b), вследствие увеличения молекулярной плотности и поступления на высоты термосферы молекул O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. Обнаружено, что поведение ионной температуры в F2-области (рис. 39e) во многом повторяет вариации температуры нейтральной атмосферы в области МНТ (рис. 39f) с временной задержкой в несколько дней (~5 суток).

**Публикации:**

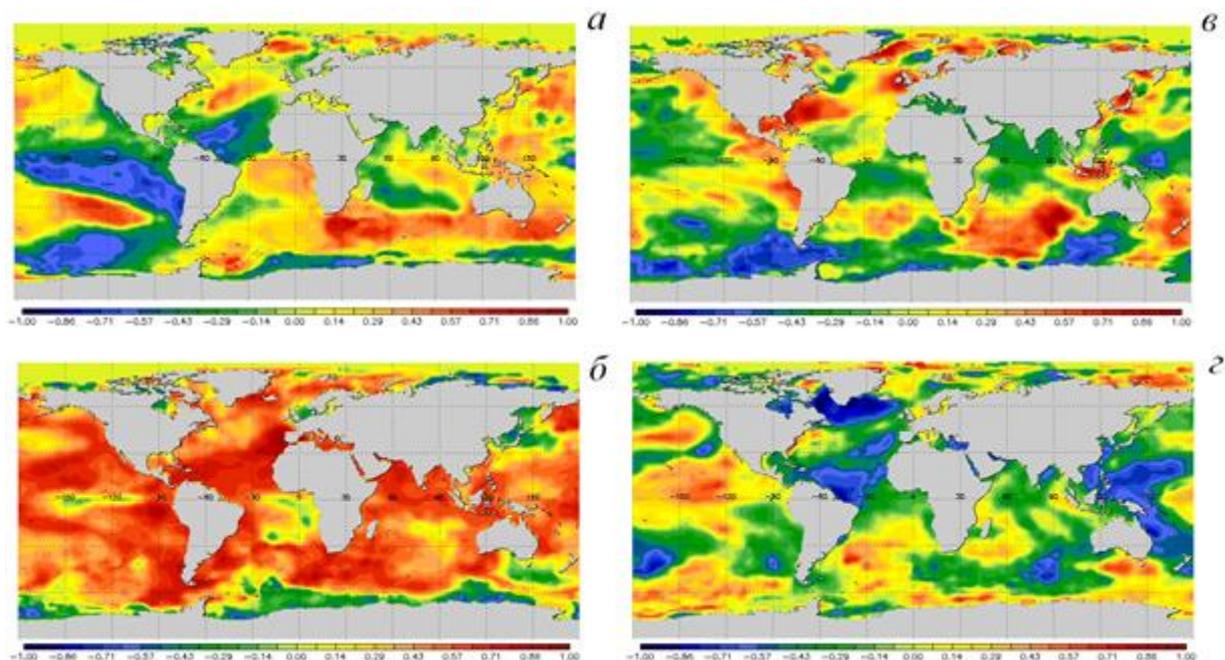
1. Medvedeva, I., Medvedev, A., Ratovsky, K., Shcherbakov, A., Tolstikov, M. Comprehensive study of disturbances of the neutral atmosphere and ionosphere parameters over Eastern Siberia during the 2013 January major sudden stratospheric warming // *Advances in Space Research* Volume 56, Issue 9. 2015. P. 1877–1885, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.008>.
2. Варгин П. Н., Медведева И.В. Исследование температурного и динамического режимов внетропической атмосферы северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012-2013 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2015, том 51, № 1. С.20-38. DOI: 10.7868/S0002351514060170.

### **2.31 Влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики.**

На основе комплексного анализа данных наблюдений и разрабатываемой в ИСЗФ СО РАН модели влияния солнечной активности на климатическую систему, выявлены основные механизмы и физические процессы, ответственные за наблюдаемые изменения регионального и глобального климата. Основной вклад в изменение климата вносят: вариации уровня солнечной активности, эффективность теплообмена в системе океан-атмосфера-суша, которая определяется изменениями ветрового напряжения. Значительное влияние на теплообмен оказывает изменения глубиной циркуляции и вертикального перемешивания в океане, долговременные изменения толщины и площади морского льда также значительно влияют на температуру и теплосодержания Мирового океана, т.е. на изменение климата.

Установлено, что климатический отклик на воздействия солнечной и геомагнитной активности характеризуется значительной пространственно-

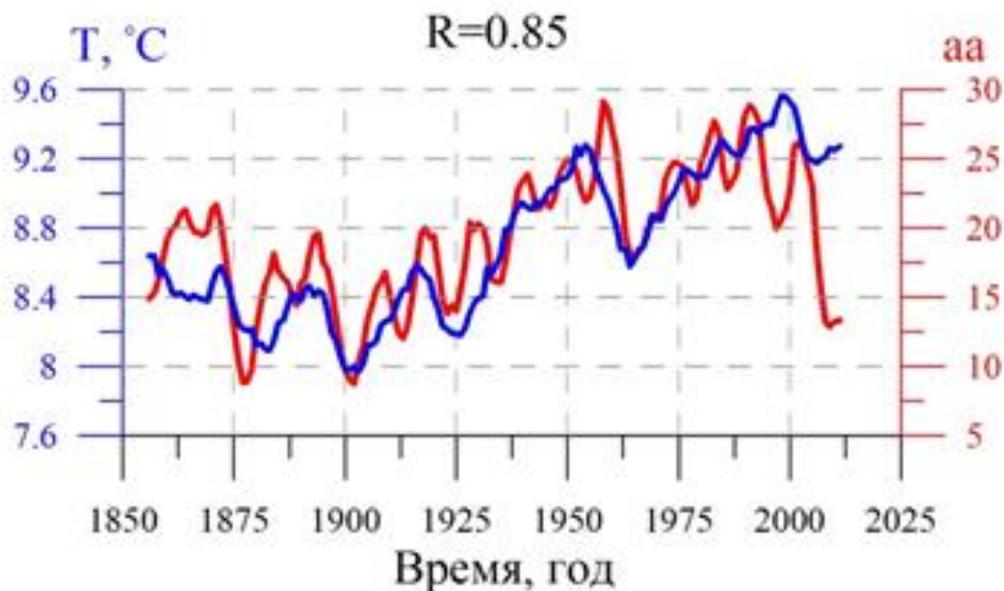
временной неоднородностью, носит региональный характер и зависит от климатической эпохи рис.40.



**Рис. 40.** Карты корреляций ТПО и aa-индекса (5-летние скользящие средние) для 4-х климатических эпох (а- период 1868-1910; б-1910-1948; в-1948-1978; г-1978-2000)

В период первого потепления (1910-1948 гг.) отклик в температуре поверхности океана (ТПО) на воздействия СА носил глобальный характер (рис. 40б). В эту эпоху увеличение геомагнитной активности характеризуется значительным положительным трендом, максимальным за весь рассмотренный временной интервал с 1868 по 2015 гг.

Обнаружены регионы, в которых долговременные изменения температуры определяются в основном вариациями солнечной активности. На рис. 41 приведены долговременные изменения ТПО в одном из этих регионов.



**Рис. 41.** Долговременные изменения ТПО и геомагнитной активности в Индийском океане (40S-50S; 30E-60E).

#### Публикации:

1. Zherebtsov G.A., Kovalenko V.A. Influence of Solar Activity on the Climate Change, Atmospheric and Oceanic Optics., 27 (6), 506-510 (2014).
2. Zherebtsov G.A., Kovalenko V.A., Kirichenko K.E. Main physical processes and mechanisms responsible for the observable climate changes in the 20-21st centuries // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 968057. doi: 10.1117/12.2205740.
3. Кириченко К.Е., Коваленко В.А., Молодых С.И. Проявление солнечной активности в температуре поверхности мирового океана // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 02. С. 154–157.
4. Kirichenko K.E., Belousova E.P., Kovalenko V.A. Wind-stress effect on the relationships between sea surface temperature and geomagnetic activity // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 96805T, doi: 10.1117/12.2205318

Контактная информация по материалу:

Ученый секретарь Института, к.ф.-м.н. Салахутдинова Ирина Игнатьевна,

e-mail: [isalakh@iszf.irk.ru](mailto:isalakh@iszf.irk.ru), тел.: (3952) 42-59-19, моб.: 89149380801