2 раздел

Результаты реализованных в 2016-2017 годах летных научных программ, наблюдений и экспериментов с использованием автоматических космических аппаратов и Международной космической станции

СОДЕРЖАНИЕ

- Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ)
- 2. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)
- Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)
- 4. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ РАН)

Основные космические проекты, реализованные в 2016-2017 гг.

2.1. Астрофизическая обсерватория – спутник ЛОМОНОСОВ (Научноисследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)



Основной целью экспериментов на борту спутника ЛОМОНОСОВ является поиск решения фундаментальной астрофизической проблемы – исследование экстремальных физических явлений в атмосфере, околоземном космическом пространстве (ОКП) и во Вселенной, а также решение важных прикладных проблем, связанных с потенциальной опасностью этих явлений в ОКП как для космических аппаратов (КА), так и для их экипажей.

А. Космические лучи предельно высоких энергий (КЛПВЭ)

Природные внегалактические ускорители создают поток частиц – КЛПВЭ с энергиями до 10¹⁹ эВ и даже более. Мощность таких ускорителей несравнимо выше, чем для существующих в нашей Галактике. В 1966 году, сразу после открытия «реликтового излучения» с температурой около 2.7°С, которое осталось после Большого взрыва, который положил начало развития нашей Вселенной, в работах американского исследователя Л.Грейзена и советских ученых Г.Зацепина (профессора МГУ) и В.Кузьмина было показано, что при энергии около 5*10¹⁹ эВ энергетический спектр КЛ может обрываться из-за взаимодействия протонов и ядер КЛ с фотонами «реликтового излучения». Обнаружение такого «обрезания» спектра показало бы, что источники КЛ таких высоких энергий находятся на расстоянии >>100 Мегапарсек. Экспериментальное подтверждение этого теоретического предположения особенно важно для определения природы КЛПВЭ. Орбитальный ультрафиолетовый телескоп ТУС, установленный на

борту спутника ЛОМОНОСОВ, стал первым экспериментом в мире по изучению КЛПВЭ из космоса.

b. Транзиентные световые явления в атмосфере

Недавние исследования транзиентных явлений в ультрафиолете (УФ) в верхней атмосфере привели к выводу, что это особый вид электрических разрядов, возникающий между облаками и ионосферой, в которых может быть сконцентрировано огромное количество энергии (иногда до сотен гигаджоулей). Эта энергия выделяется в форме электромагнитного излучения с различной частотой (от радио- до гамма-), потоков релятивистских электронов и, возможно, нейтронов. Природа этих удивительных событий до сих пор еще не ясна.

с. Гамма-всплески

Гамма-всплески – явление возникновения кратковременных всплесков космического излучения в широком диапазоне энергий – от УФ до гамма. Это одно из наиболее загадочных явления на сегодняшний день. Несмотря на значительный прогресс в понимании этого явления, его исследование остается одной из наиболее приоритетных задач современной астрофизики благодаря тому, что до сих пор нет полной ясности в вопросе механизмов генерации гамма-всплесков в источнике (как и для КЛПВЭ, основной проблемой здесь является определение самого источника – ускорителя, генерирующего фотоны).

Впервые на борту спутника ЛОМОНОСОВ будут проведены одновременные наблюдения гамма-всплесков в различных частях электромагнитного спектра – в областях видимого света, УФ и гамма-диапазоне, с использованием широкоугольных оптических камер и детекторов рентгеновского, УФ и гамма-излучения.

d. Мониторинг потенциально опасных космических объектов

Наряду с решением фундаментальных астрофизических проблем комплекс приборов для изучения гамма-всплесков, установленный на борту спутника ЛОМОНОСОВ, предназначен для решения важной прикладной проблемы — создание глобальной системы мониторинга потенциально опасных объектов в космическом пространстве. Впервые разработанная в МГУ широкоугольная оптическая камера (ШОК), установленная на борту спутника, станет основой для системы слежения за опасными космическими объектами в околоземном пространстве. Среди таких объектов, например, астероиды и большие метеориты.

Необходимо отметить, что эта система наблюдений за опасными объектами станет космическим сегментом глобальной системы мониторинга, в состав которой входит и наземная сеть телескопов МАСТЕР, аналогичных приборам ШОК, также созданная в МГУ и расположенная и в России, и за рубежом.

е. Исследования радиационных условий в околоземном космическом пространстве

В рамках проекта ЛОМОНОСОВ было решено сконцентрировать усилия на исследовании релятивистских электронов. Проблема генерации релятивистских электронов остается важной как с точки зрения фундаментальной науки (источники, ускорительные механизмы), так и с прикладной точки зрения (влияние этих частиц на бортовую электронику и материалы КА). Помимо этого, существует еще один важный аспект этой проблумы: воздействие частиц на земную атмосферу, которое связано с высыпанием частиц из геомагнитной ловушки — радиационных поясов. Это явление станет основной задачей экспериментов на борту спутника ЛОМОНОСОВ. Радиационный мониторинг окружающего космического пространства стал частью международной системы исследований и мониторинга космической радиации, создаваемой в настоящее время под руководством космических агентств.

Спутник ЛОМОНОСОВ был запущен 28 апреля 2016 года с космодрома «Восточный».





400

200

300

Not more

than 8

averaged

traffic, Gbyte/day

General configuration of the "Lomonosov" scientific complex.

2.2. Космический проект НУКЛОН (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Platform power consumption averaged during

consumption

Spacecraft mass, kg

the orbit pass, W

Spacecraft power

Scientific

during the orbit pass, W:

information



Прибор НУКЛОН – это современный детектор для исследования энергетического спектра и ядерного состава галактических космических лучей (ГКЛ) при энергиях ниже 10¹⁵ эВ. Именно эти параметры ГКЛ имеют принципиальное значение для понимания, откуда появляются в нашей Вселенной эти частицы. Проект нацелен на решение одной из острейших проблем современной астрофизики: определение механизма ускорения частиц ГКЛ. Среди наиболее вероятных механизмов ускорения на ударной волне от остатков взрывов сверхновых.



Рис.4. Экспериментальная аппаратура НУКЛОН на борту спутника «Ресурс-П».

Прибор НУЛОН был запущен в космос в декабре 2014 года в качестве попутной нагрузки на космическом аппарате «Ресурс-П».

Arrivas	NCLION	Exercise the end of the rest frame of the end of the en		
NUCLEON apparatus as a monoblock inside of vessel, on regular serial Russian satellite "Resurs-P" to a series and the series of the s				
Landbard set 213 Second with 214 with		The scientification of the third of high-energy count (syst 51,07 downsite) in the spice fractions the third of high-energy count (syst 51,07 downsite) in the spice fractions (system) of the scientification of the spice of t		
Analyse resolution can be de- monstrained and the second s		Werd of anizative (parts due 1, 4, 5) and (parts decords and of them (2)). However, the second of		
there: $ \begin{split} & \delta r^{2} & 0 < 0 \\ \delta r^{2} & \delta r^$	Image: strategies the rule: Image: strategies the rule: </td <td></td>			

2.3. Космический эксперимент РЭЛЕК на борту спутника ВЕРНОВ (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)



Проект РЭЛЕК направлен на решение фундаментальных и прикладных проблем, касающихся влияния космической радиации – релятивистских электронов радиационных поясов – на атмосферу и ионосферу Земли. Среди возможных эффектов – изменение физических свойств верхней атмосферы и, как следствие, генерация как быстропротекающих, так и длительных явлений в форме ультрафиолетовых или красных свечей энергии. Одновременно значительным выделением с ЭТИМ, co при помощи экспериментальной аппаратуры спутник исследуется гамма-излучение, связанное с усилением электрического поля при грозовой активности, а также проводятся измерения электромагнитных волн в широком частотном диапазоне. Спутник ВЕРНОВ с аппаратурой РЭЛЕК был запущен 19 июня 2014 года.



2.4. Радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

В НИИЯФ МГУ разрабатываются различные приборы для радиационных измерений в космическом пространстве. Разработанная аппаратура предназначена для раздельной регистрации потоков заряженных частиц в околоземном космическом пространстве в диапазонах энергий: 0.05 - 20 кэВ (электроны и протоны) – 1-ый диапазон, а также 0.15 – 10 МэВ (электроны) и 2 – 150 МэВ (протоны)- 2-ой диапазон. Частицы первого диапазона регистрируются с помощью электростатического анализатора, а второго – спектрометром энергичной радиации, созданного на основе трех полупроводниковых и сцинтилляционного детекторов.





Рис.5. Примеры приборов, спроектированных в ОКН.

В настоящее время аппаратура для радиационных измерений, созданные в НИИЯФ МГУ, установлены на КА «Электро» (геостационарная орбита на высоте 36 тыс. км), «Метеор» (полярная солнечно- синхронная орбита высотой ~ 820 км), «Арктика» (высокоэллиптическая орбита с большой полуосью ~ 26 тыс. км), ГЛОНАСС (круговые орбиты на высоте ~20 тысяч километров с углом наклона плоскости орбиты к плоскости экватора 65

градусов) и на борту МКС. Непрерывный мониторинг радиационных полей в космосе с энергетическим и временным разрешением, достаточным для определения динамических процессов в околоземном космическом пространстве, позволяет сформировать обширную базу данных, в частности, для усовершенствования моделей радиации.



Рис.6. Созданные в ОНК НИИЯФ МГУ приборы для измерения космической радиации работают на борту спутников МЕТЕОР, ГЛОНАСС, Электро, а также на борту Межународной космической станции.



Рис. 7. Приборы для радиационных измерений, спроектированные и созданные в ОКН НИИЯФ МГУ в настоящее время установлены на борту спутников серий LEO, GPS, GEO.

Результаты космических экспериментов, реализованных в 2016-2017 гг.

2.5. Космический эксперимент НУКЛОН (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

В начале 2015 г. начат астрофизический космический эксперимент НУКЛОН. Основной задачей эксперимента является измерение спектра ядер космических лучей в диапазоне энергий от 1 ТэВ (10^{14} эВ) до 1 ПэВ (10^{15} эВ). Уже получены спектры обильных ядер космических лучей и отношения потоков вторичных космических лучей к первичным. Полученные результаты предварительные, пока рассматриваются как поскольку спектрометр проработал на орбите не более половины ожидаемого времени. Тем не менее, некоторые из полученных результатов очень интересны. Измеренные спектры и отношения спектров показывают ряд признаков, среди которых необходимо отметить два новых явления.

Обнаружен статистически обеспеченный излом в спектре по магнитным жесткостям в области ~10 ТэВ/нуклон всех доступных для исследования обильных (т.е. рожденных главным образом в источниках) компонент КЛ (Рис. 8). В области излома происходит изменение спектрального индекса ~0,3. Достоверность данного открытия впоследствии подтверждена данными

американского эксперимента CREAM. В спектрах обильных легких ядер (р, Не, С) обнаружены признаки второго излома в области 30-50 ТэВ, с возвратом спектрального индекса к прежнему значению, данный факт статистически необеспечен и имеет характер указания. Излом спектра дает подтверждение моделей ближних источников КЛ экспериментальное различного энергетической области. Необходим типа В указанной астрофизический анализ для поиска кандидатов в нашем рукаве Галактики.

Первичные ядра КЛ ускоряются непосредственно в источниках (остатках сверхновых). Вторичные ядра КЛ при распаде первичных ядер во время взаимодействия с межзвездным газом. Ожидается, что отношение потоков вторичных ядер к потокам соответствующих «родительских» первичных ядер должно падать с ростом энергии, поскольку число вторичных ядер пропорционально времени, которое первичная частица проводит в галактике и которое должно уменьшаться с ростом энергии первичной частицы. Предполагается, что все ядра бора - вторичные частицы, а среди ядер азота вторичных частиц – большинство. На Рис.9 представлены отношения потоков ядер B/C и N/O (C и O – первичные ядра), измеренных спектрометром НУКЛОН. Видно, что данные НУКЛОНа находятся в хорошем соответствии с измерения других экспериментов в области низких энергий, но при высоких энергиях, доступных для НУКЛОНа, зависимости не падают. Это может означать, что существующие представления о происхождении вторичных частиц не вполне верны. Например, вторичные частицы могут возникать не только в процессе распространения КЛ в Галактике, но и уже на стадии ускорения частиц, т.е. часть вторичных ядер может быть ускорена в источниках, и именно за счет этого возникает большое количество высокоэнергичных вторичных ядер.



Рис. 8. Излом спектра в области R=10 ТВ: спектр жесткости протонов, ядер гелия, всех ядер с Z=6-27, и спектр всех частиц.



Рис. 9. Отношения потоков ядер B/C и N/O: при высоких энергиях отсутствует тенденция спада.

12

Публикации:

First results of the cosmic ray NUCLEON experiment. Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V., Gorbunov N., Filippov S., Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Merkin M., Panov A., Podorozhny D., Polkov D., Porokhovoy S., Shumikhin V., Sveshnikova L., Tkachenko A., Tkachev L., Turundaevskiy A., Vasiliev O., Voronin A. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017, N_{2} 7, p. 20.

The NUCLEON experiment. Results of the first year of data acquisition. Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V., Filippov S., Gorbunov N., Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Merkin M., Panov A., Podorozhny D., Polkov D., Porokhovoy S., Shumikhin V., Sveshnikova L., Tkachenko A., Tkachev L., Turundaevskiy A., Vasiliev O., Voronin A., Astroparticle Physics, 2017, vol. 90, pp. 69-74.

2.6. Эксперимент ТУС на борту спутника ЛОМОНОСОВ (Научноисследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Детектор ТУС установлен на борту спутника ЛОМОНОСОВ (международное обозначение MVL 300 или 2016-026А). Он был запущен 28 апреля 2016 года на полярную солнечно-синхронную орбиту с наклонением 97°.3, периодом обращения ~ 94 мин и высотой около 500 км.

Детектор ТУС состоит из двух основных частей: параболического зеркалаконцентратора френелевского типа и 256-пиксельного фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости зеркала. Площадь зеркала составляет около 2 м², фокальное расстояние — 1.5 м. Поле зрения прибора составляет примерно 80 км х 80 км на уровне моря. Фотоприемник состоит из ФЭУ Нататаtsu R1463 с многощелочным катодом диаметром 13 мм. Они сгруппированы в 16 идентичных модулей. Каждый кластер обладает своей системой обработки данных и источником высоковольтного питания. Центральный процессор собирает информацию со всех модулей и контролирует их работу.

Предусмотрено четыре режима работы прибора ТУС, предназначенных для наблюдения различных явлений в атмосфере в различных временных шкалах

и различным временем опроса. Основной режим (временная выборка 0.8 µ) предназначен для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), создаваемых космическими лучами предельно-высоких энергий. Этот режим эффективен и для регистрации эльфов, наиболее распространенного типа транзиентных световых явлений (ТСЯ или TLE). Режимы работы с временными выборками 25.6 µс и 0.4 µс предназначены для изучения более медленных TLE: спрайтов, голубых джетов, гигантских джетов и т. д., а с выборкой 6.6 мс — для регистрации микро-метеоров, космического мусора и грозовой активности на большем временном масштабе (~1.7 с).

Прибор ТУС на борту спутника и во время предполетной подготовки на космодроме «Восточный» представлен на Рис.10.



Рис. 10. Слева: прибор ТУС на борту спутника ЛОМОНОСОВ глазами художника. Справа: прибор ТУС на борту спутника ЛОМОНОСОВ под защитным покрытием во время предполетной подготовки на космодроме «Восточный».

Работа прибора ТУС в космосе началась 19 мая 2016 года. Непрерывные измерения проводятся с сентября 2016 года с несколькими техническими перерывами. За год работы прибором ТУС зарегистрировано около 35 тысяч событий в режиме ШАЛ на ночной части орбиты спутника. Общая экспозиция составила 530 км² год ср. Это немного по сравнению с крупными наземными экспериментами, но достаточно для поиска космических лучей с энергией выше пороговой энергии прибора E > 70 ЭэВ.

Более 10 тысяч событий, зарегистрированных в условиях минимального фонового излучения, были проанализированы в поисках возможных кандидатов в ШАЛ. На основе моделирования нескольких тысяч ШАЛ с различными параметрами первичной частицы и анализа различных типов «шума» в данных был состален список критериев, в результате применения которого было отобрано 13 событий. Следующим шагом исследования стало пособытийный анализ временной и пространственной динамики сигнала. Этот анализ направлен на поиск характерных особенностей ШАЛ, принимая во внимание характерные временные параметры, амплитуду сигнала и структуру изображения. Большинство похожих на ШАЛ событий можно отнести к быстрым сигналам от антропогенных объектов (например, аэропортов).

Первый кандидат представлен на Рис.11. Это событие было зарегистрировано 3 октября 2016 года. Его пространственно-временная динамика очень близка к ожидаемой динамике ШАЛ (для уменьшения статистических флуктуаций мы выразили сигнал в виде скользящего среднего с шириной окна M=16). Активные пиксели сгруппированы в овальное пятно. Момент максимума сигнала в каждом пикселе имеет сдвиг по отношению к максимуму в других пикселях, что можно объяснить движением изображения ШАЛ. В районах, где регистрировались подобные события, изучалась грозовая активность. Но согласно данным наземной сети локализации гроз Vaisala GLD360 в течение 10 с до и после регистрации события прибором ТУС в радиусе 930 км от места регистрации события не наблюдалось молний.



Рис.11. Кандидат в ШАЛ, зарегистрированный 3 октября 2016 года.

Публикации:

P. A. Klimov, M. I. Panasyuk, B. A. Khrenov, G. K. Garipov, N. N. Kalmykov, V. L. Petrov, S. A. Sharakin, A. V. Shirokov, I. V. Yashin, M. Y. Zotov, S. V. Biktemerova, A. A. Grinyuk, V. M. Grebenyuk, M. V. Lavrova, L. G. Tkachev, A. V. Tkachenko, I. H. Park, J. Lee, S. Jeong, O. Martinez, H. Salazar, E. Ponce, O. A. Saprykin, A. A. Botvinko, A. N. Senkovsky, and A. E. Puchkov. The TUS detector of extreme energy cosmic rays on board the Lomonosov satellite. Space Science Reviews, p. 1–17, 2017.

B. A. Khrenov, P. A. Klimov, M. I. Panasyuk, S. A. Sharakin, L. G. Tkachev, M. Yu Zotov, S. V. Biktemerova, A. A. Botvinko, N. P. Chirskaya, V. E. Eremeev, G. K. Garipov, V. M. Grebenyuk, A. A. Grinyuk, S. Jeong, N. N. Kalmykov, M. Kim, M. V. Lavrova, J. Lee, O. Martinez, I. H. Park, V. L. Petrov, E. Ponce, A. E. Puchkov, H. Salazar, O. A. Saprykin, A. N. Senkovsky, A. V. Shirokov, A. V. Tkachenko, and I. V. Yashin. First results from the tus orbital detector in the extensive air shower mode. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017.

A. Grinyuk, V. Grebenyuk, B. Khrenov, P. Klimov, M. Lavrova, M. Panasyuk, S. Sharakin, A. Shirokov, A. Tkachenko, L. Tkachev, I. Yashin, The orbital TUS detector simulation, Astroparticle Physics, http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.09.003.

P. A. Klimov, M. Yu Zotov, N. P. Chirskaya, B. A. Khrenov, G. K. Garipov, M. I. Panasyuk, S. A. Sharakin, A. V. Shirokov, I. V. Yashin, A. A. Grinyuk, A. V. Tkachenko, and L. G. Tkachev. Preliminary results from the TUS ultra-high energy cosmic ray orbital telescope: Registration of low-energy particles passing through the photodetector. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 81(4):407–409, 2017.

2.7. Наблюдения гамма-всплесков на борту спутников ВЕРНОВ и ЛОМОНОСОВ (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Спектрометр гамма-излучения и электронов является частью комплекса научной аппаратуры РЭЛЕК, установленной на борту космического аппарата ВЕРНОВ, запущенного 8 июля 2014 года. В состав прибора входит набор сцинтилляционных детекторов, состоящий из четырех идентичных детекторов рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий от 10 кэВ до 3 МэВ общей площадью около 500 см², направленный в надир, и спектрометр электронов, состоящий из трех взаимно-ортогональных детекторов, каждый из которых имеет геометрических фактор ~2 см²ср, также чувствительных к рентгеновскому и гамма-излучению.

Целью эксперимента является изучение быстро протекающих явления, в частности, гамма-вспышек земного происхождения (Terrestrial gamma-ray flashes - TGF) и высыпающихся магнитосферных электронов. Однако, прибор DRGE мог регистрировать гамма-всплески также космического происхождения и позволял не только изменения в гамма-диапазоне, но и сравнивать временные профили регистрируемых событий с измерениями других приборов РЭЛЕКа (детектора оптический И УΦ вспышек. радиочастотного и низко-частотного анализатора электромагнитных полей).

Прибору удалось зарегистрировать, по меньшей мере, два гамма-всплеска космического происхождения (GRB141011A, GRB141104A), см. Рис. 12. Их временные характеристики сравнили с параметрами, спектральные И полученными В экспериментах GBM/Fermi и KONUS-Wind. Для этих всплесков были определены красное смещение и Е_{iso}. Возможность регистрировать подобные события и хорошее согласие параметров всплесков, полученных независимым путем в различных экспериментах, стали подтверждением возможности успешной работы аналогичных детекторов на борту спутника ЛОМОНОСОВ.



Рис. 12. Зависимость эквивалентной изотропной энергии, выделенной при гамма-всплеске, E_{iso} от параметра $E_{peak}(1 + z)$ для длительных всплесков по данным эксперимента KONUS-Wind. Сплошной линией показана аппроксимация зависимости степенной функцией, пунктирными линиями ограничена область корреляции. Траектории событий GRB 141011A и GRB141104A представлены в виде функции предполагаемого красного смещения z.

Исследование мгновенного излучения гамма-всплесков (prompt emissions - PE) является одной из основных задач проекта ЛОМОНОСОВ. Научные приборы спутника – монитор гамма-всплесков BDRG с широкоугольной оптической камерой ШОК и обсерватория по наблюдению очень коротких вспышек UFFO – предназначены для наблюдения гамма-всплесков, в частности, их мгновенного излучения. Задача спектрометра гамма-излучения BDRG состоит в получении временной и спектральной информации о гамма-всплесках в диапазоне энергий 10-3000 кэВ, а также в выработке GRB тригтеров различных временных масштабов (10 мс, 1 с и 20 с) для наземных и космических телескопов, в том числе, для UFFO и ШОК. Прибор BDRG

состоит из трех идентичных блоков детекторов, оси которых расположены под углом 90° друг к другу. Такая конфигурация позволяет локализовать источник гамма-всплеска на небе с точностью около 2°.

Каждый блок детекторов содержит фосвич сцинтиллятор NaI(Tl)/CsI(Tl). Толстый кристалл CsI(Tl) размером 130 х 17 мм размещен под кристаллом NaI(Tl). Отношение счета событий в CsI(Tl) и NaI(Tl) для различных энергий может рассматриваться как независимый критерий для разделения сигналов от гамма-всплесков от ложных срабатываний, возникающих от электронов.

Данные с трех детекторов поступают в информационный блок ВА, который вырабатывает GRB тригтер и набор пакетов данных. Объем научных данных составляет ~500 Мб в день, в том числе ~180 Мб непрерывных данных для событий продолжительностью свыше 100 мс по 16 каналам для каждого детектора, подробный энергетический спектр и набор пакетов размером ~5Mb с детальной информацией о каждом событии, напоминающем всплеск. Для проверки безотказности работы прибора в космосе был проведен ряд предполетных испытаний, включая тесты алгоритмов тригтера и калибровки.



Рис. 13. Временной профиль скорости счета в сцинтилляторе NaI(Tl) детектора BDRG-2 в диапазоне энергий 20-170 кэВ для события GRB16.07.20.

Пример гамма-всплеска, зарегистрированного в эксперименте на борту спутника ЛОМОНОСОВ, представлен на Рис. 13.

Публикации:

Cosmic Gamma-Ray Bursts Detected in the RELEC Experiment Onboardthe Vernov SatelliteA.V. Bogomolov, V.V. Bogomolov, A.F. Iyudin et al. Astron. Lett.. 2017. Vol.43, Iss.8, pp.516–528. DOI: 10.1134/S1063773717080023.

Wide-Field Gamma-Spectrometer BDRG: GRB Monitor on-board the Lomonosov Mission. Svertilov S.I., Panasyuk M.I., Bogomolov V.V., et al. Space Science Reviews, publ. Kluwer Academic Publishers (Netherlands). 2018. V.214, №8, pp.1-22. DOI: 10.1007/s11214-017-0442-9.

SHOK — The first Russian Wide-Field Optical Camera in Space. Vladimir Lipunov, Evgeny Gorbovskoy, Victor Kornilov et al., Space Science Reviews, publ. Kluwer Academic Publishers (Netherlands). 2018. V.214, №6, pp.1-16. DOI: 10.1007/s11214-017-0441-x.

UFFO/Lomonosov: The Payload for the Observation of Early Photons from Gamma Ray Bursts. Park I.H., Panasyuk M.I., Reglero V., et al. Space Science Reviews, publ. Kluwer Academic Publishers (Netherlands). 2018. V.214, №14, pp.1-21. DOI 10.1007/s11214-017-0444-7.

UBAT of UFFO/Lomonosov: The X-Ray Space Telescope to Observe Early Photons from Gamma-Ray Bursts. Space Sci Rev publ. Kluwer Academic Publishers (Netherlands). 2018. V.214, №16, pp.1-25. DOI 10.1007/s11214-017-0454-5.

2.8. Солнечное гамма-излучение, зарегистрированное в эксперименте на спутнике ВЕРНОВ в сентябре-октябре 2014 года (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Рентгеновское и гамма-излучение в эксперименте на спутнике ВЕРНОВ регистрировалось при помощи детектора рентгеновского и гамма-излучения. 18 вспышек с энергией гамма-излучения >30 кэВ, измерения которых были сделаны аппаратурой РЭЛЕК в сентябре-октябре 2014 года, были связаны с одной и той же активной областью AR 12172 во время первого оборота и с областью AR 12192 во время следующего. Эти измерения сравнили с данными, полученными в экспериментах RHESSI, Konus-Wind, Fermi

Observatory, Radio Solar Telescope Net (RSTN), и Nobeyama Radioheliograph (NoRH).Примерно для одной трети вспышек, зарегистрированных аппаратурой РЭЛЕК с 24 сентября до 30 октября 2014 года, были обнаружены квазипериодичности с близкими периодами 7 ± 2 с.



Рис. 14. Временные профили излучения, измеренные во время солнечной вспышки класса С7.0 24.09.2014 в 17:49 UT аппаратурой РЭЛЕК, Konus-Wind, RHESSI и GOES, и микроволновое излучение (RSTN).

Публикации:

"Time delays in the nonthermal radiation of solar flares according to observations of the CORONAS-F satellite", Tsap, Yu. T.; Stepanov, A. V.; Kashapova, L. K.; Myagkova, I. N.; Bogomolov, A. V.; Kopylova, Yu. G.; Goldvarg, T. B., Cosmic Research, Volume 54, Issue 1, pp.285-289 (01/2016)

2.9. Каталог солнечных вспышек с регистрацией жесткого рентгеновского излучения на ИСЗ «Ломоносов» (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Эксперимент на ИСЗ «Ломоносов» показал, что жесткое рентгеновское излучение с энергией >10 кэВ может наблюдаться во время слабых вспышек классов С и В (классификация GOES по мягкому рентгеновскому излучению), что экспериментально подтверждает возможность ускорения

частиц во вспышке без нагрева солнечной плазмы. В качестве примера такого слабого события на Рис.15 приведен временной профиль вспышки класса В5.6 по GOES 11 июля (начало 08:34 - максимум 08:38 - конец 08:42), произошедшей 11 июля 2016 года в активной области AR12574.



Рис.15. Временные профили ускоренных частиц в разных диапазонах энергий.

Создан каталог солнечных вспышек, в которых было зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение Солнца. Регистрация осуществлялась спектрометром БДРГ, установленным на борту КА «Ломоносов».

N≌	Day/month of 2016	Time, start-max-end in SXR, hh:mm (GOES)	Class SXR	Time, start- end in HXR, hh:mm:ss (Ломоносов)	QPP	Other experiments	AR
1.	19/06	11:44-11:58-12:08	C1.7	11:44:20-11:57:40	+	dGoes/dt	12558
2.	09/07	09:01-09:05-09:05	B9.8	13:01:15-13:04:00	-	dGoes/dt	12564
з.	10/07	00:53-00:59-01:03	C8.6	00:56:20-00:59:40	+	F	12564
4.	18/07	08:09-08:23-08:32	C4.4	08:11:00-08:16:10	+	F	12567
5.	20/07	23:02-23:29-23:55	C5.0	23:04:45-25:05:30	-	F, N	12567
6.	21/07	00:42-00:46-50:00	M1.2	19:00:53-19:01:45	+	F, N	12567
6	07/08	05:28-05:35-05:40	C1.3	05:33:55-05:34:10	+	F	12571
7.	07/08	10:18- 10:24 -10:29	C1.6	10:22:15-10:24:50	-	F	-
9.	11/08	08:34-08:38-08:42	B5.6	08:36:20-08:37:30	-	R	1 2574
10.	14/08	19:29-19:36-19:39	C1.1	19:34:00-19:35:15	-	R	12578
11.	15/08	00:17-00:23-00:29	C1.1	00:19:20-00:22:52	+	R	12578

Рис. 16. Пример каталога солнечных вспышек с рентгеновским излучением по данным измерений аппаратуры спутника ЛОМОНОСОВ.

Публикация:

Chloe E. Pugh, V. M. Nakariakov, Anne-Marie Broomhall, Andrey V. Bogomolov, Irina N. Myagkova «Properties of quasi-periodic pulsations in solar flares from a single active region» Article in Astronomy and Astrophysics · September 2017 DOI: 10.1051/0004-6361/201731636

2.10. Динамика потоков электронов в зазоре между радиационными поясами Земли (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Исследована природа вариаций потоков субрелятивистских электронов в зазоре между радиационными поясами Земли и на полярной границе внешнего РПЗ по данным экспериментов на ИСЗ «Вернов» и «Ломоносов». Показано постоянное наличие высыпающихся электронов в высокоширотной магнитосфере, предположительно связанных с питч-угловой диффузией на искривленных магнитных линиях в области плазменного слоя и с рассеянием на электростатических волнах в области верхнего гибридного резонанса.

Публикации:

A. V. Bogomolov, I. N. Myagkova, V. V. Kalegaev, S. I. Svertilov, V. V. Bogomolov, M. I. Panasyuk, V. L. Petrov and I. V. Yashin «Precipitation of Subrelativistic-Energy Electrons near the Polar Boundary of the Earth Radiation Belt according to the Data of Measurements on the Vernov and Lomonosov Satellites» Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya), 55(6):464–468, 2017.

M. I. Panasuyk, V. V. Kalegaev, I. N. Myagkova, N. V. Kuznetsov, and M. V. Podzolko. Radiation environment at the end of active functioning of "vernov" satellite. Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya), 55(6):464–468, 2017.

Radiation environment at the end of active functioning of "Vernov" satellite Panasuyk M.I., Kalegaev V.V., Myagkova I.N., Kuznetsov N.V., Podzolko M.V. Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya), Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), 55, $N_{\rm P}$ 6, c. 464-468, 2017 **2.11. Прогнозирование вариаций потоков релятивистских электронов** внешнего радиационного пояса Земли (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Разработаны краткосрочные среднесрочные И методы прогноза радиационного состояния околоземного космического пространства вариаций потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли, и геомагнитных индексов Dst, Kp, Ap, осуществляемые при помощи искусственных нейронных Выполнено сетей. сравнение качества РПЗ прогнозирования ПОТОКОВ релятивистских электронов внешнего различными адаптивными методами - искусственными нейронными сетями, методом группового учета аргументов и методом проекций на латентные структуры, показано, что лучший результат демонстрируют нейронные сети.

Публикации:

И. Н. Мягкова, С. А. Доленко, А. О. Ефиторов, В. Р. Широкий, and Н. С. Сентемова. Прогнозирование потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите с помощью адаптивных методов. Геомагнетизм и аэрономия, 57(1):10–18, 2017.

I.Myagkova, S.Dolenko. Confirmation of the Effect of Simultaneous Time Series Prediction with Multiple Horizons at the Example of Electron Daily Fluence in Near-Earth Space. A.Lintas et al. (Eds.): ICANN-2017, Part II, Lecture Notes in Computer Science, V.10614, pp.774-775. 2017

2.12. Относительная динамика кольцевого тока – токов хвоста магнитосферы во время геомагнитных бурь разной интенсивности (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

В результате исследования потоков ионов (30-80 кэВ) по данным полярных КА *NOAA* (*POES*) исследованы зависимости от мощности 15 геомагнитных бурь величин максимальных потоков, измеренных 0-детектором (ортогональным орбите КА) на высоких широтах и в приэкваториальной области. Показано, что в то время как в приэкваториальной области максимальные потоки ионов, нормированные на |Dst|, (здесь 0-детектор измеряет потоки захваченных частиц) увеличиваются с мощностью бури, нормированные на |Dst| максимальные потоки ионов на высоких широтах (0-детектор измеряет потоки высыпающихся частиц) уменьшаются. Рассматривая приэкваториальные потоки частиц как «отражение» кольцевого тока и связывая потоки на высоких широтах с

инжекцией частиц из плазменного слоя, характеризующей токовую систему хвоста магнитосферы, получаем, что с ростом интенсивности магнитных бурь роль кольцевого тока становится доминирующей по сравнению с токами хвоста. Полученные экспериментальные результаты подтверждают подобные расчетные зависимости, сделанные на основе параболоидной модели A2000, и вывод о том, что с ростом |Dst|_{max} относительный вклад кольцевого тока в Dst возрастает по сравнению с вкладом токов хвоста.



Рис.17. Зависимость величины отношения максимального потока захваченных ионов (a) и максимального потока высыпающихся ионов (б) к минимальной величине Dst-вариации вариации $(J_{max} / |Dst|_{max})$ от $|Dst|_{max}$

Публикация:

В.В. Калегаев, Н.А. Власова Относительная динамика кольцевого тока — токов хвоста магнитосферы во время геомагнитных бурь разной интенсивности // Геомагнетизм и аэрономия, 2017, том 57, № 5, с. 572–577.

2.13. Проецирование аврорального овала на экваториальную плоскость и роль кольцевого тока в создании Dst/SYM- Н вариации (Научноисследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Определено положение проекции аврорального овала на экваториальную плоскость. Показано, что в отличии общепринятых представлений, основанных на избыточно вытянутых моделях магнитного поля, авроральный овал проецируется не на плазменный слой, а на внешнюю часть кольцевого тока. Использована методика, основанная на анализе распределения давления плазмы в условиях магнитостатического равновесия (см. Рис. 18). Полученный результат изменяет традиционные представления в области физики магнитосферных бурь и суббурь, образования внешнего радиационного пояса релятивистских электронов. Восстановлена подвергшаяся критике традиционная точка зрения, в соответствии с которой кольцевой ток вносит доминирующий вклад в Dst/SYM-H вариацию.



Рис. 18. Распределение областей аврорального свечения (голубой — диффузная зона, зеленый — авроральный овал, красный — область мягких диффузных высыпаний) -а; соответствующее распределению свечений на рисунке распределение ионного давления на малых высотах — b; распределение давления в экваториальной плоскости по данным измерений THEMIS – c.

Публикация:

Antonova E. E., M. Stepanova, I. P. Kirpichev, I. L. Ovchinnikov, V. G. Vorobjev, O. I. Yagodkina, M. O. Riazanseva, V. V. Vovchenko, M. S. Pulinets, S. S. Znatkova, N. V. Sotnikov, Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (2017), doi: 10.1016/j.jastp.2017.10.013.

2.14. Доказательство существования локальных ям магнитного поля, связанных с локальными увеличениями давления плазмы в области кольцевого тока на всех MLT (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

В ходе проведенного анализа распределения магнитного поля в экваториальной плоскости по данным спутника AMPTE/CCE было обнаружено 103 ямы магнитного поля на всех магнитных локальных временах. Данный спутник был выбран в связи с хорошими стабильными характеристиками приборов и, что еще важнее, измерениям ионного состава (так, например, в эксперименте THEMIS, ионный состав не определялся). Во всех

исследованных случаях вариации магнитного поля имели стабильный характер, что говорит в пользу предположения о выполнении условия магнитостатического равновесия, когда скорости движения плазмы много меньше звуковой и альвеновской. Проведено моделирование искажения магнитного поля зафиксированным на спутнике AMPTE/CCE профилем давления, демонстрирующее хорошее соответствие с экспериментальным данным. На Рис.19 показаны измеренные профиль давления и магнитного поля (а), сравнение (b) результатов измерений (черным) и результатов нелинейного моделирования (красным) 6 июня 1985 г., распределение ям магнитного поля по магнитному локальному времени (MLT) Показано, что ямы магнитного поля наблюдаются на всех MLT.



Рис. 19. Результаты наблюдений ямы магнитного поля и горба давления на спутнике AMPTE/CCE (a) и результаты нелинейного моделирования события 6 июня 1985 г. (черное – экспериментально измеренное магнитное поле, красное – модель) искажения магнитного поля (б) и MLT распределение обнаруженных (103 события) ям магнитного поля (с).

С

Публикации:

Vovchenko V.V., E.E. Antonova, M. Stepanova, Magnetic holes observed in the ring current region near the equatorial plane, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (2017), doi:10.1016/j.jastp.2017.08.024

Вовченко В. В., Е. Е. Антонова, Возмущение магнитного поля в магнитосфере Земли при образовании платов в радиальном распределении давления плазмы, Геомагнетизм и аэрономия, 2017, том 57, № 3, с.280–289, doi:10.7868/S0016794017030178.

2.15. Изменение положения подсолнечной магнитопаузы в результате изменения токовых систем внутри магнитосферы (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Проведен тщательный анализ результатов измерений параметров плазмы и магнитного поля при пересечениях магнитопаузы спутником THEMIS-A во время магнитной бури 14 ноября 2012 г. с минимальным Dst=-108 нТл. Основной особенностью данного события является пересечение магнитопаузы во время максимума магнитной бури. Наблюдался дисбаланс полного давления на магнитопаузе, доходивший до ~40%. Непосредственно на магнитопаузе зарегистрирован резкий разворот магнитного поля. Внутри магнитосферы наблюдались движения плазмы как вдоль магнитопаузы, так и внутрь магнитосферы со скоростями ~100-300 км/с. Проведен анализ вариаций геомагнитных параметров до и после пересечения. Показано, что во время пересечения наблюдался скачек положения магнитопаузы после начала взрывной фазы суббури. Продемонстрировано изменение положения подсолнечной магнитопаузы в результате изменения токовых систем внутри магнитосферы.





Рис.20. Изменения геомагнитных индексов и вариации параметров солнечного ветра во время магнитной бури 14.11.2012 г. (а) и изменения параметров плазмы и магнитного поля на получасовом интервале вблизи максимума магнитной бури 14.11.2012 г.

Публикации:

Пулинец М.С., И.П. Кирпичев, Е.Е. Антонова, Изменения параметров плазмы и магнитного поля при пересечении магнитопаузы во время максимума главной фазы магнитной бури 14 ноября 2012 г. Геомагнетизм и аэолномия, 2016, том 56, № 6, с. 769–778. DOI:10.7868/S0016794016060134

2.16. Определение зависимости толщины низкоширотного погранслоя магнитосферы Земли от параметров магнитного поля в солнечном ветре

(Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Определена зависимость толщина низкоширотного погранслоя (LLBL) в зависимости от параметров межпланетного магнитного поля (ММП). Использовались данные миссии THEMIS. Проанализированы данные спутников Themis-A и -C. Параметры солнечного ветра определялись на спутнике Themis-B перед ударной волной. Создана база данные, включающая 109 пересечений LLBL, в которых удалось определить толщину слоя. Учтена задержка времени распространения солнечного ветра от спутника, измеряющего параметры магнитного поля перед ударной волной, до LLBL. Использовались данных с 3 с

29

разрешением при усреднении в 180 с. Продемонстрирован большой разброс измеренных толщин LLBL и их слабая зависимость от параметров ММП. Не наблюдалась асимметрия вечер-утро толщины LLBL. Проанализирована зависимость толщины слоя от часового угла θ_{Bn}=tan⁻¹(By/Bz) ММП. Обнаружена тенденция увеличения толщины LLBL за квазипараллельной ударной волне в дневной части магнитосферы.



Рис.21. Зависимость толщины LLBL от Bz ММП для дневной и ночной частей магнитосферы.

Публикации:

Znatkova S. S., E. E. Antonova, M. S. Pulinets, I. P. Kirpichev, M. O. Riazantseva, The dependence of the LLBL thickness on IMF Bz andBy components, Advances in Space Research, V. 58, p. 268–275, doi:10.1016/j.asr.2016.01.0086, 2016.

2.17. Проникновение магнитосферных ионов через магнитопаузу (Научно-

исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Исследован механизм появления энергичных ионов в земном магнитослое с использованием данных пятиспутниковой миссии THEMIS. Исследованы пересечения магнитопаузы, когда разворот поля на магнитопаузе соответствовал большому (>50 \Box) и малому сдвигу магнитного поля (<30 \Box). Для всех проанализированных событий оценивалась скорость и толщина магнитопаузы по измерениям на двух спутниках. Спектр ионов в магнитосфере и магнитослое фитировался бикаппа распределением. На Рис.22 показан пример результатов наблюдений при большом и малом сдвиге поля на магнитопаузе и фитирования спектров ионов в моменты, выделенные пунктиром. Показано, что во время событий с большим сдвигом поля спектры на больших энергиях практически совпадают внутри и вне магнитопаузы. Во время событий с малым сдвигом потоки энергичных ионов в магнитослое уменьшаются по сравнению с магнитосферными. Подтверждено свободное проникновение ионов магнитосферы в магнитослой, когда ларморовский радиус иона становится становится становите становите становите становите становите становите становите с пользование и пример в события и онов в магнитослой, когда ларморовский радиус иона становитея сравнимым с толщиной магнитопаузы.



Рис.22. (а) Магнитное поле по измерениям на спутниках ТНЕМІЅ-Е (красный) и ТНЕМІЅ-D (черный); (b) угол магнитного склонения магнитного поля по данным THEMІЅ-E (красный) и THEMІЅ-D (черный); (c) дифференциальные потоки ионов, измеренные в интервале питч-углов 45–135°; (d) характерная энергия; (e) к и (f) плотность ионов, полученная аппроксимацией при помощи каппа (синий) и би-каппа (красный и зеленый) распределений; (g) отношение интегральных потоков ионов с энергией от 50 до 100 кэВ в направлениях перпендикулярно (45–135°) и параллельно (0–45° и 135–180°) магнитному

полю; и (h) питч-угловое распределение ионов с энергиями 50–100 кэВ. Все параметры были измерены 20.08.2007. Зелеными линиями аппроксимирована напряженность магнитного поля и показаны основные тренды при пересечении магнитопаузы в каждом случае.



Рис. 23. Дифференциальные потоки ионов в трех интервалах питч-углов, потоки измерены 20.08.2007 (а) между 10:15:01 и 10:15:13 UT (b) между 10:24:14 и 10:24:26 UT и (c) между 10:43:15 и 10:43:27 UT.

Публикация:

Kirpichev, I. P., E. E. Antonova, and M. Stepanova (2017), Ion leakage at dayside magnetopause in case of high and low magnetic shears, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, doi:10.1002/2016JA023735

2.18. Структура межпланетного пространства по наблюдениям электронов от Юпитера (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Юпитер является источником электронов МэВ-ных энергий, постоянно испускаемых им в окружающее пространство и распространяющихся во внутренней гелиосфере. Распространение Ю-электронов в пространстве определяется структурой магнитного поля внутренней гелиосферы (в пространстве между Землей и Юпитером). Наиболее благоприятны для их регистрации моменты оптимальной магнитной связи между Землей

и Юпитером), в периоды спокойного Солнца, в минимумах солнечной активности, когда магнитное поле и солнечный ветер сохраняют свою структуру длительное время.

Однако временами Ю-электроны регистрируются около Земли на каждом обороте Солнца, даже при полном отсутствии прямой связи.

В минимуме СА 1974-75 гг. Ю-электроны наблюдались в 13 последовательных оборотах Солнца, в 2007-08 гг. - в 14 оборотах. В течение этих периодов расположение Земли и Юпитера сильно меняется и для объяснения постоянного прихода Ю-электронов к Земле рассматривалась гипотетическая возможность образования магнитных ловушек при взаимодействии разноскоростных потоков солнечного ветраю. Магнитные ловушки при их вращении вместе с Солнцем способствуют переносу Ю-электронов от Юпитера к Земле при различных расположениях Земли и Юпитера.

Измерения показали, что потоки этих электронов в каждом солнечном обороте испытывали квази- 27-дневные вариации. Особенностью этих вариаций оказалось то, что их средний период не совпадал с синодическим периодом системы Солнце-Земля, равным 27.3 суткам. В 1974-75 гг. средний период вариаций потоков электронов составлял 26.8 суток, а в 2007-08 гг. – 26.2 суток. Объяснение этого эффекта найдено при учете изменения во времени структуры скоростей солнечного ветра и связанных с ней магнитных ловушек, а также влияния взаимного расположения в пространстве Земли и Юпитера, и времени их пребывания в магнитной ловушке.

Публикация:

Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. 27-дневная периодичность потоков юпитерианских электронов на орбите Земли. Астрономический журнал, издательство Наука (М.), том 94, № 12, с. 1062-1070 (2017)

2.19. Наблюдения транзиентных световых явлений на спутнике ЛОМОНОСОВ (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

Детектор ТУС, установленный на борту спутника ЛОМОНОСОВ, зарегистрировал многочисленные УФ транзиентные вспышки в режиме ШАЛ с различной временной динамикой и пространственной структурой. Наиболее распространенный тип TLE со специфической геометрией — яркое расширяющееся кольца с максимальным радиусом ~300 км — в ионосфере (на высоте 80-90 км) — это так называемые эльфы. Детектор ТУС зарегистрировал множество таких событий. Гипотеза, что это были именно эльфы, подстверждается формой трека, образованного самыми яркими ФЭУ, в форме арки (Рис.24) и скорость развития событий. На Рис.25 представлены динамика свечения отдельных пикселей и географическое расположение события.



Рис.24. Изображения фокальной плоскости с арко-подобной формой события и движением объекта через поле зрения детектора. Изображения сделаны во время t = 0.077 мс, 0.182 мс и 0.174 мс от начала записи. Цвета обозначают амплитуду сигнала произвольных единицах, масштабированных для отдельных ФЭУ.



Рис.25. Динамика свечения отдельных пикселей (по оси Y представлено отношение счета ЦАП к фоновому счету каждого пикселя) и географическое положение события типа эльфа, зарегистрированного 18 сентября 2016 года над Африкой.

В режиме TLE детектор TVC зарегистрировал несколько сотен событий. Большинство из них представляло собой мощные вспышки, связанные с грозовой активностью. Пример такой вспышки, зарегистрированной над Индией 27 июня 2016 года, представлен на Рис.26. Она возникла в поле зрения и создала мощный сигнал: произошло насышение нескольких пикселей в центре (см. Рис.27).



Рис. 26. Динамика свечения трех пикселей и геграфическое положение события 27 июня 2016 над Индией (25.°3S, 77.°8E).



Рис.27. Изображения фокальной плоскости в моменты времени t = 40 мс, 88 мс, 96.4 мс от начала записи. Цветами обозначен реальный счет ЦАП.

Для этого события был проведен анализ с базой Vaisala Global Lightning Dataset GLD360. Были обнаружены несколько молниевых событий в том же районе и в то же время, когда прибором ТУС было зарегистрировано событие, и два из них («отрицательно заряженное облако - земля») произошли в поле зрения детектора.

В режиме METEOR временное разрешение прибора составляет 6.6 мс, что позволяет записывать цифровые осциллограммы длиной 1.7 с. Это было сделано для возможности регистрации процессов, значительно более медленных, чем ШАЛ и TLE, и подходит для регистрации метеоров, атмосферного свечения от гроз и огней городов.

В течение месяца работы в этом режиме были зарегистрирован десяток метеоров. Одно из таких событий представлено на Рис. 28. Скорость метеора в предположении его горизонтального движения в поле зрения прибора ТУС составила 50-60 км/с. Метеор был зарегистрирован 3 января 2017 года в 14:31:08 UTC, что близко к максимуму метеорного потока Квадрантид в 2017 году.



Рис. 28. Динамика свечения активных пикселей при регистрации метеора 3 января 2017 года в 14:31:08 UTC.

Публикации:

P. Klimov, B. Khrenov, S. Sharakin, M. Zotov, N. Chirskaya, V. Eremeev, G. Garipov, M. Kaznacheeva, M. Panasyuk, V. L. Petrov, A. V. Shirokov, and I. V. Yashin. First results on transient atmospheric events from tracking ultraviolet setup (TUS) on board the Lomonosov satellite. Proceedings of International Symposium Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2016), p. 122–127, 2017.

Klimov Pavel and Lomonosov-UHECR/TLE Collaboration the. Ultra-high energy cosmic ray detector TUS: preliminary results of the first year of measurements. In Proceedings of Science (35th International Cosmic Ray Conference), page PoS(ICRC2017)1098, 2017.

P. A. Klimov for the Lomonosov-UHECR/TLE collaboration, UV atmospheric transient events measured by the TUS detector on board Lomonosov satellite with high temporal resolution, Proceedings of VERSIM Workshop, 19-23 March 2018, Apatity, Russia

2.20. Глобальные явления ультрафиолетового и инфракрасного свечения техногенного и природного характера по данным спутника ВЕРНОВ (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

На борту малого космического аппарата ВЕРНОВ проводилось исследование генерации транзиентных событий в верхней атмосфере Земли под действием потоков электронов и низко- и высокочастотного электромагнитного излучения. КА работал на солнечносинхронной орбите наклонением 98⁰, высотой 640–830 км. Исследования проводились в ультрафиолетовом (УФ, 240–380 нм), красном-инфракрасном (ИК, 610–800 нм), гаммадиапазонах (0.01–3 МэВ), а также при помощи детекторов электронов (0.2–15 МэВ) и высокочастотных (0.05–15 МГц) и низкочастотных (0.1 Гц–40 кГц) радио-приемников. В районах с грозовой активностью были обнаружены УФ вспышки (молниевые разряды и транзиентные световые явления (transient luminous events - TLEs). Примеры явлений с различными временными профилями представлены на Рис.29, их географическое распределение – на Рис.30.



Рис. 29. Примеры типичных временных профилей УФ вспышек по данным спутника ВЕРНОВ. Линии 1 обозначают профили в УФ, линии 2 – профили в красном-ИК диапазоне.


Рис. 30. Карта транзиентных УФ вспышек по данным спутника ВЕРНОВ.

Предполагается, что в районах с грозовой активностью транзиентные атмосферные явления (ТАЯ) связаны с молниями. По данным экспериментов на спутнике ВЕРНОВ стало ясно, что серии вспышек не только продолжительны по времени (до 10 мин), но и достаточно часты: транзиенты наблюдались с частотой 4.5 с. Пример серии ТАЯ, наблюдаемых в эксперименте на борту спутника ВЕРНОВ, представлен на Рис.31.



Рис.31. Пример серии транзиентных событий в УФ (синяя линия) и ИК (красная линия) диапазонах по данным спутника ВЕРНОВ. Представлены значения максимального сигнала, полученного за период 4.5 с в выборке 0.5 мс. Нижняя линия – значения высокого напряжения.

Во время ночных наблюдений по направлению в надир были получены данные об оптических сигналах, модулированных низкочастотным излучением и распределенных вдоль меридиана в широком диапазоне широт в северном и южном полушариях. Примеры полученных осциллограмм таких сигналов в УФ и ИК спектральных диапазонах представлены на Рис.32. В данном случае частота модуляции резко менялась от 150 до 250 Гц. Видно, что излучение в УФ и ИК диапазонах изменялось в противофазе с временным сдвигом порядка 3 мс, что может быть следствием возбуждения линий азота в атмосфере. Источником сигнала техногенного характера является процесс в атмосфере с временем высвечивания менее 1 мс, поскольку минимальное время нарастания и спада импульса на рисунке составляет 1 мс.



Рис. 32. Пример осциллограммы TLE и сигнала техногенного характера при резком изменение частоты модуляции от 150 до 250 Гц. Амплитуда осцилляций ИК-сигнала значительно превышает модуляцию УФ-сигнала.

На Рис. 33 представлено географическое распределение свечения техногенного характера, зарегистрированного 5 сентября 2014 года. Сигналы регистрировались на ночной стороне при каждом повороте во всем диапазоне свечения ночной атмосферы, от Южного полюса во время южной полярной ночи до того момента, пока спутник не выходил на освещенную сторону орбиты в северном полушарии. Для каждого временного интервала продолжительностью 4.5 с, выбиралась и записывалась наиболее яркая вспышка в форме осциллограммы продолжительностью 128 мс.



Рис. 33. Слева: пример географического распределения траекторий КА (пунктирные линии) и техногенного свечения (точки) на ночной стороне орбиты в течение 5 сентября 2014 год. Справа: Вероятность регистрации техногенного свечения в дависимости от долготы.

На Рис.33 справа представлено распределение вероятности наблюдения техногенных сигналов по долготе. Видно, что наиболее часто такие сигналы регистрировались над Австралией и Северной Америкой.

На основе времени нарастания и спада сигналов можно сделать вывод, что наиболее часто регистрировалось свечение ионов молекулярного азота. В этом случае, основываясь на отношении интенсивностей излучения в УФ и ИК диапазонах, было показано, что техногенное свечение в ночное время наблюдалось на высотах порядка 100 км. УФ и ИК сигналы имеют временной сдвиг и иногда регистрировались в противофазе, что вызвано процессами в атмосфере, а не свойствами детектора. Показано, что долготное распределение техногенного свечения совпадает с распределением наиболее мощных низкочастотных радиостанций в широком диапазоне долгот.

Публикации:

1. «Experiment on the Vernov satellite: Transient energetic processes in the Earth's atmosphere and magnetosphere. Part II. First results», Panasyuk, M. I.; Svertilov, S. I.; Bogomolov, V. V., and 42 co-authors, Cosmic Research, Volume 54, Issue 5, pp.343-350 (09/2016)

2. «Experiment on the Vernov satellite: Transient energetic processes in the Earth's atmosphere and magnetosphere. Part I: Description of the experiment », Panasyuk, M. I.; Svertilov, S. I.; Bogomolov, V. V., and 42 co-authors, Cosmic Research, Volume 54, Issue 4, pp.261-269 (07/2016)

3. «Observation of TGFs onboard "Vernov" satellite and TGEs in ground-based experiments", Bogomolov, Vitaly; Panasyuk, Mikhail; Svertilov, Sergey; and 9 co-authors, EGU General Assembly 2016, held 17-22 April, 2016 in Vienna Austria, p.8476 (04/2016).

4. «RELEC mission: Relativistic electron precipitation and TLE study on-board small spacecraft", Panasyuk, M. I.; Svertilov, S. I.; Bogomolov, V. V., and 47 co-authors, Advances in Space Research, Volume 57, Issue 3, p. 835-849, (02/2016).

5. "Detection of global phenomena of technogenic ultraviolet and infrared nightglows onboard the Vernov satellite", Garipov, G. K.; Panasyuk, M. I.; Svertilov, S. I.; Bogomolov, V. V.; Barinova, V. O.; Saleev, K. Yu., Journal of Experimental and Theoretical Physics, Volume 123, Issue 3, pp.403-410 (09/2016).

6. P. A. Klimov, G. K. Garipov, B. A. Khrenov, V. S. Morozenko, V. O. Barinova, V. V. Bogomolov, M. A. Kaznacheeva, M. I. Panasyuk, K. Yu Saleev, S. I. Svertilov. Transient atmospheric events measured by detectors on the Vernov satellite. Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics, 53(9):924–933, 2017.

7. Pavel Klimov, Gali Garipov, Boris Khrenov, Violetta Morozenko, Vera Barinova, Vitaly Bogomolov, Margarita Kaznacheeva, Mikhail Panasyuk, Kirill Saleev, and Sergey Svertilov. Vernov satellite data of transient atmospheric events. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56(8):2189–2201, 2017.

2.21. Анализ гамма-всплесков земного происхождения (Научноисследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ)

По данным детекторов гамма-излучения комплекса аппаратуры «РЭЛЕК» на спутнике «Вернов» зарегистрировано несколько гамма-всплесков земного происхождения и несколько кандидатов. Оценка частоты регистрации всплесков показала, что по порядку величины она совпадает с частотой регистрации триггерных событий других экспериментов. Большинство кандидатов в TGF наблюдались в областях, примыкающим к регионам активного грозообразования, однако, прямых указаний на совпадение гаммавсплесков с радио- или оптическими всплесками, обычно сопровождающими грозовой разряд, получено не было. Был зарегистрирован один высокоширотный кандидат (77.6° южной широты) длительностью ~2.5 мс, что больше типичной длительности гаммавсплесков, которые связывают с грозами. Большую длительность кандидата можно объяснить рождением короткоживущих изотопов в материале детектора или двумя последовательными, перекрывающимися во времени TGF. В качестве возможного фактора имитации гамма-всплеска могут также рассматриваться релятивистские электроны. Однако, в каналах детектирования электронов никаких значимых возрастаний во время регистрации всплеска не наблюдалось. Хотя однозначно определить природу этого кандидата пока не представляется возможным, формальных оснований вычеркнуть высокоширотный всплеск из числа кандидатов в TGF нет. Если этот кандидат будет подтвержден как TGF при последующем анализе данных, то впервые будет обнаружена TGF активность в высоких широтах, вероятно, не связанная с грозовой активностью.



Рис.34. Распределение гамма-квантов в (а) пособытийной записи и (b) Временном профиле TGF 18.09.2014, 10:15:34 UTC.

Публикация:

Observation of Terrestrial Gamma-Ray Flashes in the RELEC Space Experiment on the Vernov Satellite. V. V. Bogomolova, M. I. Panasyuka, S. I. Svertilov, ISSN 0010-9525, Cosmic Research, 2017, Vol. 55, No. 3, pp. 159–168. 2017. DOI : 10.1134/S0010952517030017

2.22. Наблюдение за радиационной ситуацией в околоземном космическом пространстве в Центре оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ



Центр оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ осуществляет оперативный анализ и прогнозирование радиационных условий в околоземном космическом пространстве (<u>http://swx.sinp.msu.ru/</u>). На сайтах Центра (<u>http://smdc.sinp.msu.ru/</u> и

41

<u>http://swx.sinp.msu.ru/</u>) публикуются текущие данные об уровне солнечной активности, состоянии геомагнитного поля и радиационных условиях в магнитосфере Земли и гелиосфере в режиме квази-реального времени. На основе научных моделей факторов космического пространства разработаны программные продукты, внедренные в интернетприложения, которые обеспечивают прогнозирование геомагнитных и радиационных условий на заданных орбитах и по всей магнитосфере:

- прогноз солнечного ветра в точке L1. В этом приложении на основании параметров корональных дыр прогнозируются скорости рекуррентных высокоскоростных потоков примерно на 3 дня вперед;

- прогноз параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на орбите Земли; для простой модели распространения в качестве входных параметров используются плазменные и магнитные измерения в точке L1;

- прогноз Dst-индекса по результатам работы искусственных нейронных сетей в зависимости от измерений солнечного ветра в точке L1;

- прогноз потоков релятивистских электроново внешнего радиационного пояса с энергий более 2 МэВ при помощи искусственных нейронных сетей.

Все прогнозы основаны на измерениях, собранных в интегрированную базу данных Центра. Для программных продуктов используются данные спутников GOES, ACE, Electro-L1, Electro-L2, Meteor-M1, Meteor-M2, а также изображения со спутников SDO. Графические приложения (<u>http://swx.sinp.msu.ru/current.php?lang=en</u>) дают возможность одновременно анализировать данные из разных источников. Для работы спутников особое значение имеют доза радиации и данные об одиночных сбоях вдоль орбиты. Спутники постоянно находятся под влиянием потоков высоко-энергичных частиц. Программные средства Центра при расчете радиационной дозы, обусловленной энергичными частицами на низких околоземных орбитах учитывают три основных источника частиц: радиационные пояса Земли, галактические космические лучи и солнечные энергичные частицы, принимая в расчет геомагнитное обрезание в зависимости от уровня геомагнитной активности. Результаты комплексного анализа всех данных «от Солнца до Земли», полученных в возмущенный период конца февраля 2014 года, представлены на Рис.35-37.



Рис. 35. Прогнозирование Dst (красная линия) и данные измерения Dst 16.02-6.03.2014



Рис. 36. Потоки солнечных энергичных протонов по данным измерений спутника Electro-L1 16.02-6.03.2014



Рис.37. Прогнозирование флюенсов внешнего радиационного пояса (красная линия) и измерения на спутнике GOES (черная линия) 16.02-6.03.2014.

2.23. Продолжено развитие нового метода ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций по магнитному потоку диммингов

и постэруптивных аркад. Разработана процедура перехода от данных SOHO к данным SDO (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Метод был разработан и изложен в статьях Chertok *et al.*, (Solar Phys. **282**, 175, 2013 и **290**, 627, 2015; J. Phys.: Conf. Series, **409**, 012150, 2013) по данным телескопа крайнего ультрафиолетового диапазона ЕІТ и магнитографа MDI на борту космической обсерватории Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) на основе анализа солнечных эрупций (Coronal Mass Ejections, CME) и вызываемых ими интенсивных нерекуррентных геомагнитных бурь и форбуш-понижений, произошедших в течение 23-его солнечного цикла (1997–2006 гг.). В настоящее время соответствующие патрульные солнечные наблюдения выполняются на аппарате Solar Dynamic Observatory (SDO) при помощи ультрафиолетового телескопа AIA и магнитографа HMI.

С целью дальнейшего развития метода и его практического использования, в частности, в Центре прогнозирования космической погоды ИЗМИРАН, за период совместных наблюдений SOHO и SDO в 2010-2011 гг. проведено сравнение: (1) локализации и формы площадок диммингов и аркад, выделяемых на изображениях ЕІТ и AIA, (2) потоков продольного магнитного поля, измеренных на магнитографах MDI и HMI в крупных активных областях, находящихся в центральной зоне солнечного диска.



Рис. 1. Вверху: яркие постэруптивные аркады и тёмные димминги на разностных изображениях SOHO/EIT в канале 195 Å для эрупций 23.05.2010 (а) и 13.06.2012 (b). Внизу: соответствующие предвспышечные SDO/HMI магнитограммы (c, d) с наложенными на них контурами выделенных диммингов (тёмно-зелёный для AIA и светло-зелёный для EIT) и аркад (синий для AIA и розовый для EIT). Контуры иллюстрируют соответствие между площадками, выделенными на изображениях двух инструментов.



Рис. 2. Соотношение между магнитными потоками крупнейших активных областей за период с мая 2010 г. по апрель 2011 г. по данным MDI и HMI. Штриховая линия соответствует Фтdi = 1.4 Фhmi.

Установлено, что при принятых ранее критериях и корректном учёте различий в откликах телескопов EIT и AIA, на соответствующих изображениях выделяются совпадающие площадки диммингов и аркад (Рис. 1), а магнитный поток MDI (Фmdi) систематически превышает поток HMI (Фhmi) на один и тот же фактор, который близок к 1,4 (Рис.2). Отсюда следует, что для перехода от данных SOHO к данным SDO достаточно использовать соотношение Фhmi = 1,4 Фmdi.

С учётом этих результатов получены преобразованные эмпирические соотношения, позволяющие по эруптивному магнитному потоку, измеряемому на SDO, с заблаговременностью от 1 до 4 суток оценивать основные параметры предстоящих возмущений космической погоды у Земли: интенсивность нерекуррентных геомагнитных бурь (индексы Dst и Ap) и амплитуду Форбуш-понижений, а также времена их начала и пика. Приведены примеры такой диагностики крупнейших эрупций 24-ого цикла солнечной активности.

Chertok I.M., Abunin A.A., Grechnev, V.V. An Early Diagnostics of the Geoeffectiveness of Solar Eruptions from Photospheric Magnetic Flux Observations: Transition from SOHO to SDO. Solar Phys., v. 292, No. 4, paper 62, 2017. <u>https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11207-017-1081-8</u>

https://arxiv.org/abs/1702.05905

2.24. По данным регулярных измерений потока мягкого рентгеновского излучения Солнца на спутниках GOES в течение циклов 21-24 обнаружено, что соотношение между кратковременными (SDE) И длительными (LDE) вспышками меняется не хаотически, а имеет характер регулярных, устойчивых квазидвухлетних вариаций С 30÷40% амплитудой ДО (Институт земного магнетизма, ионосферы u распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

По данным спутников GOES в диапазоне 1–8 Å за солнечные циклы 23, 24 и частично 21, 22 сопоставлены средние временные параметры (времена нарастания и затухания, длительность) и доля импульсных, кратковременных (SDE) и постепенных, продолжительных (LDE) событий среди вспышек баллов С и ≥М1.0.

Обнаружено, что доля SDE вспышек балла ≥М1.0 (включая спайки) в цикле 24 превышает соответствующую долю в цикле 23 по всем трём временным параметрам на фазе максимума и по времени затухания на фазе подъёма активности. Однако, циклы 23 и 24 только слегка отличаются по доле SDE вспышек балла С. Временные параметры SDE вспышек, их доля и, следовательно, соотношение между SDE и LDE вспышками не остаются постоянными, а обнаруживают регулярные изменения в пределах отдельных циклов и при переходе от одного цикла к другому. На всех фазах всех четырёх циклов эти изменения имеют характер отчётливых «квазидвухлетних» осциляций (QBO) большой амплитуды. В разных циклах и на отдельных фазах конкретных циклов такие QBO накладываются на различные систематические тренды, которые демонстрируют анализируемые вспышечные временные параметры. В цикле 24 доля SDE вспышек балла ≥М1.0 из N- и S-полусфер Солнца показывает наиболее отчётливые, синхронные QBO. Амплитуда QBO и общая изменчивость интенсивных >M1.0-вспышек почти всегда и вспышек балла С. Эти упорядоченные количественные качественные вариации характера вспышек в ходе заметно больше, чем у умеренных солнечных циклов обсуждаются в рамках концепции, что SDE вспышки связаны, в основном с мелкими пятнами (включая такие пятна в развитых активных областях) и что мелкие и крупные пятна ведут себя поразному и формируют две различающиеся популяции.



Рис. 1. Вариации некоторых параметров вспышек балла С (красные линии и кружки) и балла $\geq M1.0$ (синие линии и кружки) на фоне месячных чисел солнечных пятен (SSN) в течение циклов 23 и 24: (а) среднее время спада (dt2); (b) доля кратковременных вспышек с dt2<10 мин.

Chertok I.M., Belov A.V. Long- and Mid-Term Variations of the Soft X-ray Flare Character in Solar Cycles. Solar Physics, v. 292, No., paper 144, 2017. DOI: 10.1007/s11207-017-1169-1.

<u>https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11207-017-1169-1</u> <u>https://arxiv.org/abs/1710.06837</u> http://www.izmiran.ru/~ichertok/FlareVariations/preprint.pdf

2.25. По данным и спутниковых измерений наземных BO время выдающегося всплеска солнечной вспышечной активности в начале сентября 2017 количественное Г. подтверждено качественное И соответствие радиопотока частотного спектра микроволновых И всплесков, с одной стороны, и интенсивности приходящих к Земле потоков протонов и их энергетического спектра в диапазоне энергий десятки МэВ, - с другой (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)..

47

Мощные вспышки, произошедшие на Солнце 4–10 сентября 2017 г., проанализированы на основе методики количественной диагностики протонных вспышек, разработанной в ИЗМИРАН в 1970–1980-х гг. Показано, что потоки и энергетические спектры пришедших к Земле протонов с энергией десятки МэВ качественно и количественно соответствуют интенсивности и частотным спектрам микроволновых радиовсплесков в диапазоне 2.7–15.4 ГГц. В частности, вспышка 4 сентября с пиковым радиопотоком S ~2000 sfu на частоте f ~3 ГГц (т.е. с мягким радиоспектром) сопровождалась значительным потоком протонов J (>10 МэВ) ~100 pfu и мягким энергетическим спектром с показателем $\gamma \sim 3.0$, а мощная вспышка 10 сентября с S ~ 21000 sfu на $f \sim 15$ ГГц (т.е. с жестким радиоспектром) привела к весьма интенсивному протонному событию с $J(>10 \text{ M}) \sim 1000 \text{ pfu}$ с жестким энергетическим спектром ($\gamma \sim 1.4$), в том числе к наземному возрастанию (GLE72). Это является еще одним свидетельством того, что данные о микроволновых радиовсплесках могут с успехом использоваться для диагностики протонных вспышек независимо от конкретного источника ускорения частиц на Солнце, в частности, с применением методики ИЗМИРАН.



Рис. 1. Временные профили рентгеновских вспышек и потоков протонов у Земли для постэруптивного события 4 сент. 2017 г. с мягким радио и энергетическим спектром (левый ряд) и для мощной длительной вспышки 10 сент. 2017 г. (правый ряд) с жестким радио и энергетическим спектром протонов. В центре - частотный спектр микроволновых всплесков этих двух вспышек.

Chertok I.M. Powerful Solar Flares of 2017 September: Correspondence between Parameters of Microwave Bursts and Proton Fluxes near Earth. Research Notes of the American Astronomical Society. V. 2. Id. 20. 2018. DOI: 10.3847/2515-5172/aaaab7

<u>http://iopscience.iop.org/article/10.3847/2515-5172/aaaab7</u><u>https://doi.org/10.3847/2515-5172/aaaab7</u> 5172/aaaab7 https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1802/1802.00191.pdf

Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам. Геомагнетизм и аэрономия, Т. 58, №4, 2018. 2.26. Особенности пространственного распределения ОНЧ сигналов передатчиков навигационной сети Альфа по данным спутника DEMETER (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

По данным спутника DEMETER проанализированы особенности для местной полуночи пространственного распределения ОНЧ сигналов трех российских передатчиков навигационной сети Альфа (Краснодар, Новосибирск и Хабаровск) в течение декабря 2008 г. Передатчики имеют одинаковую мощность 500 кВт и излучаемые частоты: 11,9 кГц, 12,6 кГц и 14,9 кГц. Показано, что в ионосфере на высоте 670 км, как в зоне передатчиков, так и магнитносопряженных областях южного полушария максимальное электрическое поле достигало 10^4 мкВ²м⁻²Гц⁻¹, а площадь горизонтального покрытия по долготе превышала 80° на частоте 14,9 кГц с электрическим полем выше 10мкВ²м⁻²Гц⁻¹. Среди трех передатчиков для западной станции Краснодар (КРА) обнаружено наименьшее электрическое поле и наименьшая протяженность по долготе на частоте 14,9 кГц. По результатам моделирования распространения ОНЧ радиоволн показано, что в данном случае важную негативную роль играет максимальная плотность электронов в нижней ионосфере, а геомагнитное наклонение приводит к смещению на юг максимальной интенсивности для всех трех передатчиков и к быстрому затуханию в северном направлении.



Рис.1. Пространственное распределение электрического поля на частоте 14.9 кГц трех навигаторов Альфа (желтые звездочки) в верхней ионосфере в декабре 2008 г.

Zhang, X., V. Frolov, C. Zhou, S. Zhao, Y. Ruzhin, X. Shen, Z. Zhima, and J. Liu (2016), Plasma perturbations HF-induced in the topside ionosphere, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, doi:10.1002/2016JA022484

2.27. Анализ вызванных стендом SURA-HF возмущений плазмы с помощью данных спутникового наблюдения (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Три типичных возмущения плазмы, вызванные нагревом SURA HF, были тщательно отобраны и проанализированы с помощью данных спутникового наблюдения DEMETER датчиков ISL и IAP. Некоторые общие особенности проявляются как: (1) плотность электронов и электронная температура увеличились в течение периода нагрева; (2) как плотность О +, так и ионная температура также увеличивались, в то время как Н + отрицательно изменялся с плотностью О +; (3) ионы двигались вверх с процессом нагрева и ускорялись в направлении вверх и на север от градиента температурного давления, что также приводило к изменениям электрического поля ULF из-за эффектов VxB; (4) результаты моделирования подтверждают плотность электронов И повышение температуры в верхней ионосфере из-за омического процесса нагрева и тепловой самофокусирующей неустойчивости над областью нагрева, что согласуется с явлениями наблюдения со стороны спутника DEMETER.



Рис.1. Численное моделирование возмущений Ne (a) и Te (б), под действием высокочастотного излучения комплекса СУРА в 18:16 UT в мае 2008 г.

X. Zhang, S. F. Zhao, Y. Ruzhin, R. Song. The VLF emissions over Russian ALPHA transmitters by DEMETER observations. Abstracts 12th conference "Physics of plasma in the Solar system" IKI, Moscow, 6-10.02_2017, P.283. <u>http://plasma2017.cosmos.ru</u> **2.28.** Спутниковая модель *foF2* в высокоширотной зимней ионосфере, включающая ионосферный провал (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Построена высокоточная эмпирическая модель *foF2* в высокоширотной зимней ионосфере северного и южного полушарий в интервале географических широт 40-85 . Модель справедлива для спокойных условий Кр=2 для всех уровней солнечной активности в диапазоне F10.7=70-200. Модель охватывает период ноябрь-февраль в северном полушарии и май-август в южном. Модель построена по данным внешнего зондирования на спутнике Интеркосмос-19, данным радиозатменных наблюдений в экспериментах GRACE, CHAMP и COSMIC и данным прямых измерений на спутнике СНАМР. Абсолютные значения foF2 дополнительно контролировались по модели IRI, т.е. в модели косвенно учтены и данные наземного зондирования. Таким образом, для построения модели были фактически использованы все доступные ионосферные данные. Модель впервые воспроизводит структуру ионосферного провала – его положение и форму. Поэтому модель может быть использована в задачах распространения радиоволн на высокоширотных трассах. В целом модель гораздо более точно, чем IRI, описывает долготные и широтные вариации foF2 в зимней ионосфере. На Рис.1 для примера приведено распределение foF2 в северном полушарии для 00LT при высокой солнечной активности и для 12 LT при низкой активности. Модель установлена на сайте ИЗМИРАН: http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/.



Рис.1. Распределение foF2 в северном полушарии для высокой солнечной активности для полуночи (вверху) и для низкой активности для полудня (внизу). Черные кривые – положение минимума провала.

Karpachev A.T., *Klimenko M.V.*, *Klimenko V.V.*, *Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions.* // J. Atmos. Sol-Terr. Phys. v.146, pp.149–159. doi:10.1016/j.jastp.2016.05.008. 2016.

Klimenko V.V., Karpachev A.T., Klimenko M.V., Ratovskii K.G., Korenkova N.A. Latitudinal structure of the longitudinal effect in the nighttime ionosphere during the summer and winter solstice // Russian J. of Physical Chemistry B, v.10, No 1, pp.91–99. 2016.

2.29. Суточные и долготные вариации структуры экваториальной аномалии в периоды равноденствий по данным ИСЗ "Интеркосмос-19" (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Впервые построена полная картина вариаций структуры экваториальной аномалии (ЭА) с местным временем и долготой для высокой солнечной активности в период равноденствия. Для этого использованы данные внешнего зондирования с борта ИСЗ "Интеркосмос-19". Показано, что ЭА начинает формироваться с 08 LT при образовании южного гребня. Развитие ЭА связано с изменением направления электрического поля с западного на восточное, что обусловливает вертикальный дрейф плазмы *W*, направленный вверх, и фонтан-эффект. В 10 LT проявляются оба гребня аномалии, но полностью симметричными они становятся только к 14 LT. Среднее положение гребней увеличивается с I=20° в 10 LT до I=28° в 14 LT. При этом положение гребней довольно сильно, иногда вплоть до 15°, изменяется с долготой. Величина foF2 над экватором и степень развития ЭА (EAI) в 12-14 LT изменяются с долготой согласно изменениям скорости вертикального дрейфа плазмы W. В долготных вариациях W, foF2 и EAI в это время наблюдаются 4 гармоники. Через 1.5-2.0 ч после вечернего всплеска скорости вертикального дрейфа плазмы степень развития ЭА возрастает до максимума. Долготные вариации foF2 для 20-22 LT также связаны с соответствующими вариациями скорости вертикального дрейфа плазмы. Степень развития ЭА после максимума в 20 LT падает, гребни уменьшаются по величине и сдвигаются к экватору, но еще в полночь аномалия хорошо развита. После полуночи максимумы foF2 в области гребней аномалии, наоборот, оказываются дальше от экватора, но это уже очевидно связано с действием нейтрального ветра. В 02 LT по контрасту с утренними часами четко выражен только северный гребень аномалии. Таким образом, при высокой солнечной активности во время равноденствий хорошо выраженная ЭА наблюдается с 10 до 24 LT, максимального развития она достигает в 20 LT. На рис.1 для примера приведены вариации foF_2 в период развития ЭА.



Рис. 1. Вариации foF2 во время развития экваториальной аномалии (для 08, 10, 12 и 14 LT).

Карпачев А.Т. Суточные и долготные вариации структуры экваториальной аномалии в периоды равноденствий по данным ИСЗ «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэрономия. T.58. № 3. 2018 (в печати).

2.30. Первые наблюдения ионосферных плазменных «пузырей» над

Европой (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Как известно, неоднородности ионосферной плазмы экваториального происхождения (equatorial plasma bubbles, плазменные «пузыри») никогда не регистрировались на средних широтах в Европейском регионе. Во время сильной геомагнитной бури 22-23 июня 2015 г, прямое проникновение электрических полей с высоких широт к экватору на фоне вечернего усиления экваториальных зональных электрических полей привело к возникновению крупномасштабного (~15°-20° в широтном направлении) понижения электронной концентрации в вечернем секторе экваториальных широт Западной Африки и к появлению крупномасштабных плазменных «пузырей», вытянутых вдоль магнитных силовых линий в сторону Европы. Впервые, используя многостанционные GPS и ГЛОНАСС наблюдения (~1500 станций), эффекты экваториальных плазменных «пузырей» были зарегистрированы над территорией Европы. Они наблюдались в течение более чем 8 ч (20–04 UT) и занимали обширную зону в пределах 30°–40° с.ш. и 20° з.д. - 10° в.д.

Результаты появления плазменных «пузырей» в Европейских средних широтах были подтверждены также измерениями электронной концентрации на борту спутников Swarm и DMSP. Было показано, что появление данных неоднородностей вызвало значительное увеличение ошибок позиционирования (в 10 раз), предоставляемых EGNOS (европейская геостационарная служба навигационного покрытия).



Рис.1. Двухмерные карты ROTI (индекс скорости изменения TEC), построенные по многостанционным GPS и ГЛОНАСС наблюдениям для Европейского региона 22-23 июня 2015 г. Красным цветом (высокие значения ROTI) показано появление и эволюция трех плазменных «пузырей» над территорией Европы.

Cherniak, I., and Zakharenkova, I. (2016). First observations of super plasma bubbles in Europe. Geophys. Res. Lett. 43(21), 11137-11145. doi:10.1002/2016GL071421.

2.31. Эффекты проявления аномалии моря Уэддлла в наземных и спутниковых GPS TEC измерениях (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Как известно, аномалия Моря Уэдделла (WSA) - это летняя аномалия, которая характеризуется большей плотностью ионосферной плазмы в ночное время, чем в дневное время в области вблизи географического положения моря Уэдделла. Проявление эффектов WSA, в основном, относят к высотам F2 пика (200-300 км). Было провели исследование эффектов WSA во внешней ионосфере с помощью измерений GPS сигналов на борту трех спутников Swarm для определения внешнего TEC (выше высоты орбиты ~500 км) в

системе внешняя ионосфера-плазмосфера. Глобальные карты распределения внешнего ТЕС показали, что зона со значительным эффектом WSA (увеличение TEC ~ 2-4 раза) имеет обширную протяженность над южной частью Тихого океана и Атлантического океана. Впервые эффекты WSA были выявлены в измерениях внешнего TEC по данным GPS измерений на борту спутниковой группировки Swarm.



Рис.1. (слева) Глобальные карты внешнего ТЕС, построенные по GPS измерениям на борту спутника Swarm A (SWA) в высотном диапазоне 500-20000 км, (справа) глобальные карты нормированных на полдень значений ТЕС для ночных локальных часов в декабре 2014 г – январе 2015 г. Эффекты проявления аномалия моря Уэддлла видны в южной части Тихого Океана преимущественно у берегов Южной Америки.

Zakharenkova, I., Cherniak, I., & Shagimuratov, I. (2017). Observations of the Weddell Sea Anomaly in the ground-based and space-borne TEC measurements. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 161, 105–117. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.014

2.32. Оценка качества воспроизведения полного электронного содержания во внешней ионосфере эмпирическими моделями с плазмосферным расширением NeQuick 2 и IRI-Plas (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Корректная спецификация электронной концентрации на высотах внешней ионосферы является одной из наиболее актуальных проблем для эмпирических ионосферных моделей. Были получены новые результаты совместного анализа данных полного электронного содержания (TEC), полученных с помощью GPS измерений на борту спутников GOCE и TerraSAR-X с высотой орбиты 250 км и 500 км, соответственно, с данными двух эмпирических моделей с плазмосферным расширением: NeQuick 2 и IRI-Plas (разработана в ИЗМИРАНе). Проанализированы два периода низкой (2009/2010 гг) и умеренной (2012 г) солнечной активности. Было установлено, что модель IRI-Plas переоценивает значения электронной концентрации в интервале высот 250-500 км для низкой солнечной активности и полного электронного содержания (ТЕС) во внешней ионосфере для диапазона высот 500-20 000 км в дневное местное время при низкой и умеренной солнечной активности. Модель NeQuick 2 воспроиводит подобные результаты, как и IRI-Plas, для области высот 250-500 км и показывает противоположное поведение для региона выше 500 км с заниженными значениями для всех рассматриваемых сезонов и местного времени. Было обнаружено, что наиболее важный регион для существенных различий модель / модель находится в диапазоне высоты 500-2000 км. Наблюдаемое занижение результатов TEC в NeQuick 2 может быть связано с упрощенной экстраполяцией профиля электронной концентрации до высоты орбиты GPS, без использования моделей плазмосферы. Однако модель плазмосферы, включенный в IRI-Plas, приводит к заметной переоценке значений TEC, полученных по спутниковым GPS измерениям.



Рис.1. Глобальные карты разностей полного электронного содержания (TEC) значений «модель vs. наблюдения» для декабря 2012 г: (слева) NeQuick 2 модель; (справа) IRI-Plas модель. Видно, что в высотном диапазоне 250-500 км (верхняя панель) обе модели дают схожие величины отклонений от реальных измерений, в то время как на высотах выше

500 км (нижняя панель) NeQuick 2 воспроизводит заниженные значения TEC, а модель IRI-Plas практически глобально завышает значения TEC во внешней ионосфере/плазмосфере.

Cherniak, I., & Zakharenkova, I. (2016). NeQuick and IRI-Plas model performance on topside electron content representation: Spaceborne GPS measurements. Radio Science, 51, 752–766. https://doi.org/10.1002/2015RS005905

2.33. Изучение преимуществ совместного использования наблюдений GPS и ГЛОНАСС для мониторинга неоднородностей ионосферной плазмы в высоких широтах (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Используя обширную базу данных, составленную из GNSS наблюдений ~5800 наземных станций, было проведено исследование динамики высокоширотных ионосферных неоднородностей во время геомагнитной бури 22-23 июня 2015. Впервые карты индекса ROTI (Rate of TEC Index), применяемого как индикатор наличия и интенсивности ионосферных плазменных градиентов, были построены с высоким пространственным разрешением для обоих полушарий с использованием как GPS, так и ГЛОНАСС измерений. Было показано, что дополнительное использование ГЛОНАСС позволяет значительно увеличить возможности мониторинга ионосферных неоднородностей для регионов с незначительным покрытием GNSS станциями (Северная Канада, Россия, Антарктика), в то время как для регионов с хорошим покрытием (США, Европа) – позволяет в 1.5-2 раза увеличить количество данных наблюдений.



Рис. 1. Пример покрытия данными для Северного и Южного полушарий в широтном диапазоне 30°-90° за 1 час: (b) только GPS измерения; (c) совместные GPS и ГЛОНАСС измерения; (d) процентный вклад ГЛОНАСС данных в каждую ячейку размером 1 градус.

Cherniak I., Zakharenkova, I. (2017) New advantages of the combined GPS and GLONASS observations for high-latitude ionospheric irregularities monitoring: Case study of June 2015 geomagnetic storm. Earth, Planets and Space, 69:66. doi:10.1186/s40623-017-0652-0

2.34. Проект наземно-космического радиоинтерферометра РадиоАстрон (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук)

Миссия РадиоАстрон представляет собой наземно-космическую систему РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), предназначенную для исследования структуры космических радиоисточников со сверхвысоким угловым разрешением, которое обеспечивается огромными базами радиоинтерферометра, достигающими значений порядка 350000 км.

Наземно-космический радиоинтерферометр РадиоАстрон состоит из 10-метрого космического радиотелескопа (КРТ), установленного на борту космического аппарата СПЕКТР-Р, который обращается вокруг Земли по эллиптической орбите с периодом около 9 дней. КРТ работает в четырех диапазонах длин волн 92, 18, 6.2 и 1.2-1.6 см. Наземно-космический радиоинтерферометр обеспечивает измерение угловых размеров радиоисточников с максимальным угловым разрешением в 7 микросекунд дуги на волне 1.3 см и на максимальной наземно-космической базе. РадиоАстрон также позволяет получать изображения наиболее ярких источников при наблюдениях вблизи плоскости орбиты или вблизи прохождения перигея, где реализуются необходимые комбинации проекций наземно-космических баз. Основные параметры наземно-космического радиоинтерферометра приводятся в таблице 1.

Диапазон	Частотный	Угловое	Системная		Чувствительность
(см)	интервал	разрешение	температура (кЯн)		(мЯн)
	(МГц)	(мксек)	LCP и RCP		
92 (P)	316 - 332	530	13.3	13.5	14
18 (L)	1636 - 1692	100	2.76	2.93	3
6.2 (C)	4804 - 4860	35	11.6	_	5
1.2 – 1.6 (K)	18372 – 25132	7	46.7	36.8	16

Таблица 1

В каждом частотном диапазоне имеются два поляризационных канала приемника (LCP и RCP) с полосой регистрации сигнала шириной 2×16 МГц (верхняя и нижняя субполосы). В диапазоне Р нижняя полоса не содержит полезного сигнала из-за влияния входного фильтра. В диапазоне С работоспособным оказался только один поляризационный канал с левой круговой поляризацией (LCP). Угловое разрешение наземно-космического радиоинтерферометра указано для максимальной проекции базы на уровне ширины интерференционного лепестка. Чувствительность приведена по уровню среднеквадратического уклонения (1 сигма) для времени интегрирования 300 секунд в одной 16-МГц полосе с использованием 110-метрового радиотелескопа обсерватории Грин Бэнк в качестве наземного плеча радиоинтерферометра.

Миссия РадиоАстрон выполняется под общим руководством Астрокосмического центра Физического института им П.Н. Лебедева (АКЦ ФИАН). Управление спутником СПЕКТР-Р осуществляется Научно-производственным объединением им. Лавочкина (НПОЛ). Определение орбиты КА и необходимые вычисления для управления и обработки данных проводятся Баллистической группой Института прикладной математики им. М.В. Келдыша. Прием научных данных производится двумя специализированными телеметрическими станциями в Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) и обсерватории Грин Бэнк (США).

Основной объем корреляции наблюдательных данных выполняется на программируемом корреляторе Центра обработки научных информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН; в первичной обработке данных также участвуют корреляционные центры в

Институте радиоастрономии Макса Планка (Бонн, Германия) и в Объединенном институте РСДБ (JIVE, Нидерланды).

Большое значение для осуществления миссии играет участие крупных наземных радиотелескопов по всему миру, оно осуществляется на основе конкурсных заявок. Некоторые обсерватории в рамках специальных соглашений выделяют наблюдательное время на своих радиотелескопах.

Для координации разработки и выполнения научной программы миссии создан Международный координационный совет (RISC, RadioAstron International Science Council), который состоит из представителей АКЦ ФИАН, НПОЛ, сотрудников участвующих в наблюдениях обсерваторий и других представителей международной радиоастрономической общественности. На своих ежегодных встречах и дополнительных телеконференциях RISC обсуждает возможные направления научных исследований, а также полученные результаты наблюдений в процессе работы миссии.

Научная программа проекта РадиоАстрон состоит из трех основных частей: Ранняя научная программа (РНП), Ключевая научная программа (КНП) и Общее наблюдательное время (ОНВ). В результате выполнения РНП, которая закончилась в июне 2013 г., были исследованы все возможности наземно-космического радиоинтерферометра, испытаны различные методы проведения научных исследований с его помощью, что открыло дорогу для выполнения открытых программ КНП и ОНВ. Они стартовали в июле 2013 г.

В 2016-2018 гг. наземно-космический радиоинтерферометр РадиоАстрон ведет наблюдения по программам АО-4 и АО-5. Вместе эти программы состоят из 25 научных проектов, отобранных Советом экспертов проекта РадиоАстрон на конкурсной основе. Всего в исследованиях приняли участие ученые около двадцати стран.

В рамках научной программы миссии РадиоАстрон изучаются три группы космических объектов: квазары – ядра далеких галактик, пульсары – нейтронные звезды нашей галактики, мазеры – области образования звезд и планет в нашей галактике и в других галактиках. Наземное плечо радиоинтерферометра обеспечивают более 40 радиотелескопов России, Украины, Австралии, Великобритании, Германии, Индии, Испании, Италии, Нидерландов, Польши, Швеции, Финляндии, Китая, Южной Кореи, ЮАР, США, Японии и др. Получены успешные результаты по всем научным направлениям. Реализовано рекордное угловое разрешение, составляющее несколько стотысячных долей угловой секунды.

Ниже приводятся научные результаты, полученные в 2016-2018 гг. С полным списком публикаций по проекту РадиоАстрон можно ознакомиться по ссылке: http://www.asc.rssi.ru/radioastron/publications/publ.html

Основные научные результаты по внегалактическим объектам

2.35. Высокая яркостная температура, обнаруженная радиоинтерферометром РадиоАстрон в источнике B0529+483, и влияние межзвездного рассеяния (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук)

Наблюдения наземно-космического радиоинтерферометра РадиоАстрон показывают, что в джетах многих квазаров наблюдаются яркостные температуры 10¹³ К и выше. Такие высокие значения требуют пересмотра теории излучения джета. Однако, рефракционное рассеяние на межзвездной среде может искажать результаты измерений яркостной температуры, создавая на изображении ложные яркие и компактные пятна. В работе данной ΜЫ количественно описываем свойства рассеяния, также а квазара В0529+483. субмиллисекундную структуру ядра Используя измерения РадиоАстрона на частотах 1.7, 4.8 и 22 ГГц на проекциях базы до 240 тыс. км, мы обнаружили два характерных размера в ядре квазара: около 100 и около 10 микросекунд дуги. Мы показали, что хотя признаки рассеяния и присутствуют в данных на низкой частоте (1.7 ГГц), яркостная температура данного квазара все равно превышает 10¹³ К по результатам измерений на частотах 4.8 и 22 ГГц. Для объяснения этого результата требуется признать, что плотность энергии частиц многократно превышает плотность энергии магнитного поля в ядре данного квазара.



61

Рис. 1. На картинке показаны результаты измерения амплитуды интерференционной функции видности от проекции базы на частоте 4.8 ГГц. Синие линии и область отвечают наиболее простой модели изображения, которая плохо описывает мелкомасштабную структуру изображения. Красная и зеленая линии соответствуют более сложной модели, содержащей две компоненты размерами около 100 и около 10 микросекунд дуги. Малое различие между зеленой и красной линиями указывает на малое влияние рассеяния на результат.

2.36. Наземные и космические радионаблюдения экстремального блазара АО 0235+164 (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук)

Измерения яркостных температур и эффектов, возникающих в результате действия синхротронного самопоглощения, позволяют судить о физических условиях в ядрах блазаров. Были исследованы характеристики ультракомпактного блазара АО 0235+164 с помощью наблюдений

радиоинтерферометре наземно-космическом РадиоАстрон, многочастотных на наблюдений VLBA и EVN, а также наблюдений в режиме мониторинга на одиночных антеннах. Моделирование источника в области пространственных частот и последующее усреднение множества эпох наблюдений позволило получить структуру источника и оценить кинематику компонента выброса. Задержки появления пиков вспышек на разных частотах получены с применением регрессии Гауссовым процессом. Частотная зависимость размеров ядра и задержек свидетельствуют в пользу преобладания синхротронного самопоглощения в ядре источника. Величина внутренней яркостной температуры, измеренная по наземным данным, близка к значению равнораспределения. В то же время, по измерениям РадиоАстрон эта величина достигает 10¹⁴ K, что может быть связано с наличием сверхкомпактной структуры в ядре блазара с размерами менее 10 угловых микросекунд. В 2007-2016 гг. распределение компонентов выброса носит бимодальный характер, что свидетельствует в пользу изгиба выброса и изменения его направления с южного на северное. Наблюдаемый угол раскрыва джета на 43 ГГц оказывается в 2 раза больше, чем на 15 ГГц, что говорит о его коллимации. Мы оценили ряд физических параметров источника, как то Лоренц-фактор, Доплер-фактор, углы наклона и раскрыва выброса, величину и градиент магнитного поля в ядре и другие.



Рис. 2. Наблюдаемые яркостные температуры AO 0235+164 по наземным измерениям VLBA на 43 ГГц и наземно-космическим наблюдениям РадиоАстрон на 1.7, 5 и 22 ГГц. Стрелки показывают оценки минимальных значений с использованием пределов по разрешению. Кривая отображает изменение плотности потока ядра (правя ось).

2.37. Изучение самых внутренних областей джетов в АГЯ и их магнитных полей в проекте РадиоАстрон: наблюдения 3С 273 в минимуме активности (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Завершен анализ наблюдений знаменитого квазара 3С 273, выполненных на частоте 22 ГГц в 2014 г. В этих наблюдениях проекция базы наземно-космического радиоинтерферометра составила около 9 диаметров Земли, что обеспечило угловое разрешение 0.3 мас. В этот раз объект находился в состоянии низкой активности, ввиду чего полученные оценки яркостной температуры интересно было сравнить с полученными ранее, примерно год тому назад, когда источник проявлял максимум активности. В своем анализе мы также использовали данные обзора VLBA-BU-BLAZAR, что позволило проследить кинематику джета за полтора года. В результате было показано, что в спокойной фазе яркостная температура в сто раз ниже, чем в фазе активности в 2013 г., когда было получено значение 1.4×10^{13} K, в системе отсчета источника. Яркостная температура в спокойной фазе оказалась даже в десять раз ниже, чем она должна быть для случая равнораспределения.

Анализ эволюции джета на частоте 43 ГГц показывает, что через 2 месяца после эпохи 2013 г. был сформирован новый компонент джета; этот компонент виден и на нашей карте на частоте 22 ГГц. Следовательно, он располагался вне ядра во время максимума яркостной температуры. Наблюдения на космическом телескопе Fermi LAT в период 20102014 гг. не показывают наличие каких-либо вспышек в гамма-диапазоне, связанных с появлением нового компонента, обнаруженного на частоте 43 ГГц.

Таким образом, анализ указывает на то, что обнаруженные ранее экстремальновысокие яркостные температуры в квазаре 3С 273, превосходящие предел обратного Комптоновского эффекта, относятся к короткоживущей фазе активности объекта, когда нарушается равновесное условие равнораспределения. Следовательно, измерения яркостной температуры на наземно-космическом радиоинтерферометре с базами, обеспечивающими микросекундное угловое разрешение, нельзя интерпретировать впрямую, как нарушение известных физических ограничений в астрофизических источниках.



Рис. 3. Радиокарта квазара 3С 273, полученная на частоте 22 ГГц на наземнокосмическом радиоинтерферометре РадиоАстрон при поддержке глобальной сети радиотелескопов. Карта построена с однородным взвешиванием. Самые слабые контуры проведены на уровне значимости 5 сигма.

2.38. Широкий коллимированный джет в источнике 3С 84 на масштабах нескольких сотен гравитационных радиусов (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

По сей день учеными обсуждаются базовые гипотезы формирования выбросов плазмы в галактиках. До последнего времени астрофизики, занимающиеся далекими

галактиками, отдавали предпочтение модели Блэнфорда-Знаека: они склонялись к тому, что джеты в галактиках формируются центральной сверхмассивной черной дырой. Международная команда исследователей из 8 стран получила изображение джета, зарождающегося в окрестности центральной черной дыры гигантской эллиптической галактики NGC 1275 (Персей А). Использование РадиоАстрона позволило восстановить карту этой области с ультравысоким угловым разрешением (Рис. 4). Благодаря близости объекта, реализуемое линейное разрешение составляет величину всего лишь 12 световых дней на расстоянии 70 мегапарсек или 230 миллионов световых лет. Благодаря такому беспрецедентному разрешению наземно-космического радиоинтерферометра РадиоАстрон, ученые увидели, что основание джета сформировалось широким (около тысячи гравитационных радиусов) и имеет цилиндрическую форму. Это может означать, что, по крайней мере, внешняя часть струи запускается с помощью аккреционного диска. На его форму влияет внешний кокон, возникающий в результате взаимодействия джета с окружающей его средой.



Рис. 4. Тонкая структура джета в источнике 3С 84.

Исследования галактических и внегалактических мазеров водяного пара

2.39. Мегамазер водяного пара в галактике NGC 4258 (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Зоны мегамазерного излучения в галактике NG C4258 образуют диск размером в 0.5 пк, видимый почти с ребра, окружающий активное галактическое ядро, которое также классифицируется как CSO. Молекулярные облака в этом диске проектируются на южную часть CSO и усиливаются излучением этого источника. Из-за орбитального движения облаков в диске они дрейфуют в спектре со скоростью 8.1 км/с/год в интервале скоростей 440-550 км/с. Систематическая (космологическая) скорость галактики NGC 4258 составляет 472 км/с, что соответствует расстоянию до галактики 7 Мпк.

К настоящему моменту мегамазерное излучение в NGC 4258 было продетектировано (получены интерференционные отклики) в 11 экспериментах с наземнокосмическим радиоинтерферометром РадиоАстрон, первое детектирование проводилось в 2014 г. Впервые детектирование было проведено на проекциях базы в 1.9 диаметров Земли, а рекордное детектирование было получено при проекции базы в 26.7 диаметра Земли (340000 км). Это дало рекордное для проекта угловое разрешение в 8 микросекунд дуги.

При таком высоком разрешении диффузная часть мазерных компонент уже не даёт вклада в интерференционный отклик, но наиболее компактные части остаются неразрешенными. На рис. 5 приведен радиоинтерферометрический отклик для проекции базы в 26.7 диаметров Земли КРТ-Медичина, где можно отождествить несколько компонент(ов) с пространственным масштабом в 56 а.е. Само обнаружение этих компактных деталей налагает жесткие ограничения на степень насыщенности мазера и на процессы накачки. Более того, эти компактные мазерные области, весьма вероятно, имеют слабое магнитное поле с простой структурой. Это может обеспечить возможность оценки напряженности магнитного поля по свойствам поляризации.



Рис. 5. Интерференционный лепесток от мегамазера NGC 4258 на базе КРТ-Медичина. Проекция базы примерно 26.7 диаметров Земли. Цветом показано отношение сигнал / шум в плоскости остаточная задержка – частота интерференции.

2.40. Мазеры водяного пара размером с Солнце в области зведообразования Цефей А (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

В одном из ранних экспериментов наземно-космический радиоинтерферометр РадиоАстрон обнаружил на проекции базы более 3 диаметров Земли мазерное излучение в линии водяного пара на частоте 22 ГГц от области звездообразования массивных звезд Цефей А. Оно находится в одноименном созвездии на расстоянии более 2000 световых лет от Солнца. Было обнаружено несколько компактных мазерных деталей (см. Рис 4, пятна на скорости 0.6 и -16.9 км/с). Одна из наблюдаемая скорости 0.6 км/с, деталей. на выглядит на наземных базах радиоинтерферометра как одиночная линия с гауссовым профилем, а на длинных наземно-космических базах разрешается на две спектральные компоненты, разнесенные по скорости и содержащие примерно 13% от полного потока. Последующий анализ показал, что эта структура соответствует двум неразрешенным пространственным компонентам мазера с угловыми размерами меньше 15 микросекунд дуги каждая, т.е. размером примерно с Солнце. Они разнесены на 160 микросекунд дуги или около

67

0.1 астрономических единиц вдоль направления движения потока молекулярного газа от соседней молодой звезды и окружены протяженным гало. На настоящий момент эти объекты являются самыми маленькими структурами, когда-либо наблюдавшимися в мазерах в нашей Галактике. В работе были рассмотрены различные варианты происхождения наблюдаемой структуры, наиболее вероятным из которых является объяснение в рамках модели турбулентности, возникшей в результате взаимодействия потока газа, выброшенного соседней молодой звездой, с каким-то препятствием. Результаты этой работы были опубликованы в статье А.М. Sobolev, J.M. Moran, M.D. Gray, А. Alakoz, H. Imai, W.A. Baan, A.M. Tolmachev, V.A. Samodurov, и D.A. Ladeyshchikov, 2018, ApJ, 856, id. 60.



Рис. 6. Центральная часть области звездообразования Цефей А. Контурами показано непрерывное излучение на длине волны 1.35 см из статьи Torrelles et al. (1998). Точками показаны положения мазеров, определенные в рамках данного эксперимента. Вставка: модель мазерного излучения, видимого на скорости 0.6 км/с. Показаны две компактных компоненты, разнесенные на 160 микросекунд дуги и расположенные вдоль направления потока газа от HW3dii.

2.41. Тонкая пространственная структура мазера H₂O в глобуле IC 1396 N (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Глобула IC 1396 N, расположенная на расстоянии 750 пк, была выбрана для исследования с ультравысоким разрешением РадиоАстрона. В области наблюдается активное формирование звезд промежуточной массы, обнаружены несколько молодых звездных объектов, а также молекулярные потоки. В направлении самого яркого звездного объекта в области IRAS 21391+5802 (460L[©]) был найден сильный мазер H₂O, его мониторинг выполняется на протяжении более чем 20 лет.

В 2014 г. пять сессий наблюдений IC 1396 N были выполнены на космическом телескопе РадиоАстрон и сети наземных телескопов нескольких стран. Отклик от источника не был обнаружен на наземно-космических базах, что указывает на нижний предел размера мазера > 0.03 а.е. и на верхний предел яркостной температуры 6.25×10^{12} К. На наземных базах была обнаружена структура, которая наблюдалась в 1996 г. и была интерпретирована как кеплеровский диск (Слыш и др., 1999). Другими словами, на протяжении 18 лет пространственная структура мазера, которой соответствует центральная часть спектра с интервалом скорости примерно ±1.5 км/с, сохраняется на масштабе менее 20 миллисекунд дуги, что на расстоянии 750 пк соответствует линейному размеру около 15 а.е.

2.42. Исследование вспышек мазера H₂O в областях образования массивных звезд с ультравысоким угловым разрешением (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Получено детектирование сигнала от очень компактной детали вспыхивающего мазера H₂O, ассоциирующегося с областью образования массивных звезд G25.65+1.05.

Детектирование было получено в двух сессиях наблюдений с РадиоАстроном, выполненных в августе и сентябре 2017 г. совместно с сетью VLBA (США), а также радиотелескопами Торуньской (Польша) и Хартебестхукской (Южная Африка) радиоастрономических обсерваторий. В этих наблюдениях длина проекции базы достигала 9.3 диаметров Земли, что соответствует угловому разрешению ~24 мас или линейному размеру излучающей области ~0.05 а.е., учитывая расстояние до источника 2.08 кпк.

Такие значения очень близки к рекордному угловому разрешению, полученному ранее в наблюдениях другого мазера H₂O в W49N.

Исследования пульсаров

2.43. Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности, как индикаторы сверхсильной электромагнитной волны (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Проведен анализ спектров и функций видности от гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности по данным РСДБ наблюдений в проекте РадиоАстрон, проводившихся в 2015 г. Измерены параметры рассеяния импульсов на межзвездной среде: время рассеяния и полоса декорреляции. Проведен сравнительный анализ формы спектров и функций видности гигантских импульсов в реальных наблюдениях с формой спектров и функций видности, полученных путем моделирования рассеяния. Результаты сравнения позволили сделать вывод о наличии в структуре гигантских импульсов коротких всплесков (dt < 30 нс) на частоте 1668 МГц, яркостная температура которых превышает 1038 К. Такие импульсы распространяются в магнитосфере пульсара в режиме сильной электромагнитной волны, что приводит к генерации дополнительного излучения в направлениях, перпендикулярных направлению распространения гигантских импульсов. Это излучение можно сопоставить с аномальными компонентами среднего профиля пульсара, наблюдаемыми на частотах выше 4 ГГц.



Рис. 7. Сравнение наблюдаемых и смоделированных функций видности. В каждой паре верхняя картинка соответствует модели, а нижняя наблюдениям.

2.44. Распределение межзвездной плазмы в направлении пульсара B0525+21 по данным наземно-космической радиоинтерферометрии (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Наблюдения на наземно-космическом радиоинтерферометре с участием телескопов Грин-Бэнк, Аресибо и РадиоАстрон на частоте 1668 МГц позволили исследовать характеристики межзвездной плазмы в направлении пульсара PSR B0525+21. Максимальная проекция базы для наземно-космического радиоинтерферометра была 233600 км. Показано, что мерцания являются сильными, спектр неоднородностей межзвездной плазмы является степенным с показателем n = 3.74, что соответствует колмогоровскому спектру неоднородностей. С применением новой методики оценки размера диска рассеяния мы измерили угол рассеяния (радиус) в направлении пульсара PSR B0525+21: θ scat = 0.028 ± 0.002 угловых миллисекунд. Было показано, что в этом направлении рассеяние излучения происходит на слое плазмы, находящемся на

расстоянии 0.1Z от пульсара, где Z – расстояние от пульсара до наблюдателя. Для принятого нами Z = 1.6 кпк экран находится на расстоянии 1.44 кпк от наблюдателя.

2.45. Обнаружение плотных слоев межзвездной плазмы в наблюдениях с наземно-космическим радиоинтерферометром РадиоАстрон (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Проведены наблюдения пяти пульсаров (В0823+26, В0834+06, В1237+25, В1929+10 и В2016+28) по научной программе проекта РадиоАстрон на частоте 327 МГц. Благодаря высокой разрешающей силе наземно-космического радиоинтерферометра, были измерены размеры кружков рассеяния для этих объектов. Измеренные значения заключены в интервале от 0.6 до 2.8 миллисекунд дуги. С использованием модели тонкого рассеивающего экрана, несколькими способами определены расстояния до такого эффективного экрана. Модель равномерного рассеяния радиоволн на луче зрения не подходит ни для одного объекта. Было сделано заключение, что наблюдаемое рассеяние радиоволн происходит на сравнительно компактных слоях плазмы в нашей галактике. На рис. 8 черточками обозначено положение выделенных экранов на луче зрения к каждому пульсару.



Рис. 8. Схема расположения рассеивающих экранов относительно спиральной структуры Галактики
2.46. Эксперимент по проверке общей теории относительности Эйнштейна (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук).

Ключевая РадиоАстрона научная программа по измерению эффекта гравитационного красного смещения завершила этап сбора данных. Наблюдения выполнены при поддержке сетей наземных радиотелескопов EVN и NRAO (Бадары – Россия, Эффельсберг – Германия, GBT – США, Хертбизтхоук – ЮАР, Онсала – Швеция, Светлое – Россия, VLBA – США, Ветцель – Германия, Ярагади – Австралия, Йебес – Испания, Зеленчукская-Россия). Целью программы является проверка основополагающего принципа общей теории относительности – эйнштейновского принципа эквивалентности. Более точно, научная группа решает задачу проверки эйнштейновской формулы для эффекта гравитационного замедления времени, или гравитационного красного смещения, которая является прямым следствием принципа эквивалентности. Экспериментальная констатация существования эффекта не представляет затруднений, так как он имеет большую относительно величину: для РадиоАстрона он составляет -58 микросекунд в сутки (отрицательный знак связан с тем, что на борту время течет быстрее, чем для наземного наблюдателя). Принципиальную важность имеет точность измерения эффекта. Наилучший результат здесь был достигнут в 1976 году в рамках американской миссии Gravity Probe A.

В результате сравнения частоты высокостабильного атомного водородного стандарта на борту суборбитального зонда и аналогичного наземного стандарта справедливость формулы Эйнштейна подтверждена 0.01%. была с точностью Эксперимент с РадиоАстроном выполнен по схожей схеме, но обладает рядом преимуществ: измерения выполнены с более стабильным бортовым водородным стандартом; благодаря высокоэллиптической орбите удалось добиться большей глубины модуляции эффекта и, наконец, измерения проведены многократно. С учетом всех этих факторов, а также на основе оценки качества собранных данных, научная группа рассчитывает улучшить точность эксперимента на порядок по сравнению с Gravity Probe А. Этот результат должен будет стать важной вехой на пути решения крайне важной задачи – нахождения того масштаба явлений, на котором общая теория относительности нарушается и начинают проявляться тонкие эффекты более общей теории, такой как В своей вышедшей статье (Литвинов теория струн. только что И дp., https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.09.014) научная группа дает обзор методики проведения эксперимента и приводит отчет о его текущем состоянии. Рис. 9 иллюстрирует

предварительные результаты обработки данных одного из экспериментов. Несмотря на то, что процесс обработки данных далек от завершения, достигнутая на сегодняшний день точность уже находится на уровне Gravity Probe A.



Рис. 9. Иллюстрация результатов обработки данных в эксперименте, выполненном в мае 2016 года. Эксперимент состоит из трех измерений, выполненных на сильно различных удалениях спутника от Земли. Каждое измерение продолжалось в течение часа. В этих измерениях принимали участие 4 наземных радиотелескопа в Эффельсберге, Онмале, Светлом и в Ветцеле. Две части рисунка показывают величину остаточной частоты, измеренной в однопутевом и двухпутевом режимах на телескопе в Онсале. Однопутевой сигнал содержит полезную информацию о сдвиге частоты на борту КА, а двухпутевой сигнал используется для компенсации вклада атмосферы и нерелятивистских допплеровских сдвигов частоты. Измерения проводились попеременно в этих двух режимах с общим циклом 4 минуты. Однопутевые остатки частоты и содержат гравитационное красное смещение.

2.47. Проектно-баллистические исследования и баллистиконавигационное обеспечение полётов космических аппаратов. «Радиоастрон» (Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН)

Выполнены работы по баллистико-навигационному обеспечению управления полётом и проведения научных экспериментов КА «Спектр-Р» проекта «РадиоАстрон». Рассчитана и успешно проведена коррекция траектории КА «Спектр-Р». Коррекция обеспечила выполнение требуемых условий по времени баллистического существования и освещённости Солнцем КА не менее чем до конца 2019 года.

Баллистико-навигационное обеспечение радиоинтерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами с использованием КА «Спектр-Р». Космический радиотелескоп, установленный на борту КА «Спектр-Р», является элементом наземно-космического интерферометра, вынесенным относительно наземных радиотелескопов на расстояние, ограниченное апогеем орбиты КА – 300 тыс. км. Это позволяет достичь высокого разрешения наблюдаемых объектов. Обработка данных, полученных наземно-

космическим интерферометром, невозможна без точных параметров орбиты КА «Спектр-Р». Восстановление параметров движения КА «Спектр-Р» с точностью, необходимой для обработки научной информации, по данным траекторных измерений является сложной задачей. Её сложность, в том числе обусловлена тем, что в ходе ежедневных сеансов разгрузки двигателей маховиков возникают возмущения движения центра масс. Для восстановления параметров движения КА «Спектр-Р» разработана и реализована специальная методика одновременной обработки траекторных измерений и данных о включении двигателей, поступающих в составе телеметрии. В качестве траекторных измерений используются запросные измерения наклонной дальности и радиальной скорости наземных радиотехнических систем в Уссурийске и Медвежьих Озерах, измерения станций лазерной дальнометрии, а также беззапросные измерений радиальной скорости в Х-диапазоне, выполненные станциями ВИРК в Пущино и Грин-Бэнк. Это позволило успешно выполнить навигационное обеспечение международной программы научных исследований наземно-космическим интерферометром: выполнить измерения интерферометрических откликов от двух пульсаров и нескольких внегалактических источников с рекордным угловым разрешением. Результаты уточнения параметров движения космического аппарата «Спектр-Р», выполненные в 2016 г. показали, что с вероятностью, близкой к единице, в январе 2018 года нарушается условие его пребывания в тени от Земли, а в мае этого же года завершается его баллистическое существование. Поэтому была рассчитана и 16 июля 2017 года успешно проведена коррекция траектории КА «Спектр-Р».Коррекция обеспечила выполнение требуемых условий по времени баллистического существования и освещённости Солнцем КА не менее чем до конца 2019 года.

Публикации

Заславский Г.С., Захваткин М.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г. и др. Баллистиконавигационное обеспечение управления полётом КА и выполнения научной программы проекта «РадиоАстрон». Пять лет полёта // Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина». 2016. Т.33. №3. С. 25-37.

Заславский Г.С., Захваткин М.В., Кардашев Н.С., Ковалев Ю.Ю., Михайлов Е.А., Попов М.В., Соколовский К.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г. Проектирование коррекции траектории космического аппарата СПЕКТР-Р при наличии погружений его в сферу влияния Луны // Космические исследования. 2017. Т. 55, № 4. С. 305-320.