

XV КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ
КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**
11–13 апреля 2018 года, ИКИ РАН, Москва

СБОРНИК ТРУДОВ

Под редакцией
А. М. Садовского

Серия «Механика, управление и информатика»

МОСКВА
ИКИ РАН
2018

**XV Young Scientists Conference
“Fundamental and Applied Space Researches”**

IKI RAN, Moscow, April 11–13, 2018

**Proceedings
Ed. A. M. Sadovski**

The XV Young Scientists Conference “Fundamental and applied space research” dedicated to the Cosmonautics Day, took place on 11–13 April 2018, at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (web site <http://kmu.cosmos.ru>). Traditionally, the conference was arranged by the Scientific and Educational Centre of the Space Research Institute of the Russian Academy of Science. Students, postgraduates and young scientists (up to 35 year-old), connected with space and space research, participated in the conference. Once again the Conference has become the largest youth forum, dedicated to space physics. Within three days about 120 reports were submitted. In „The Young Scientists Conference papers” you may find the selected conference participants articles. The collection is included in the Russian Science Citation Index.

**XV Конференция молодых учёных
«Фундаментальные и прикладные космические исследования»**

ИКИ РАН, Москва, 11–13 апреля 2018 г.

**Сборник трудов
Под ред. А. М. Садовского**

11–13 апреля 2018 г. в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) состоялась XV Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (сайт конференции <http://kmu.cosmos.ru>), посвящённая Дню космонавтики. Конференция проводилась Научно-образовательным центром ИКИ РАН. В конференции принимали участие студенты, аспиранты и молодые ученые (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. В очередной раз конференция стала самым крупным молодежным форумом, посвященным космической физике. За три дня работы было представлено около 120 докладов. «Сборник трудов Конференции молодых ученых» содержит избранные статьи, написанные авторами докладов. Сборник включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Компьютерная вёрстка: *Комарова Н. Ю.*
Дизайн обложки: *Давыдов В. М., Захаров А. Н.*

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.
Отдельные статьи даны в авторской редакции.
Качество иллюстраций соответствует предоставленному авторами материалу.

Электронная версия сборника размещена на сайтах ИКИ РАН <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>
и Российской научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru/>.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследования космического пространства космическими аппаратами — одно из фундаментальных направлений современной физики и астрономии. Наиболее перспективные направления исследований — это астрофизические, геофизические, медико-биологические исследования, солнечно-земная физика, мониторинг Земли и её природных ресурсов и др. Огромный прогресс в этих направлениях достигнут с помощью космических средств исследования, дальнейшие перспективы в этом направлении представляются ещё более обещающими. Весьма важными для научно-технологического развития Российской Федерации являются практические вопросы, решение которых даст возможность наиболее глубокого изучения нашей планеты: в частности, развитие технологий дистанционного зондирования Земли, космическое приборостроение, изучение околоземного пространства, Солнца, которое является главным фактором обсуждаемой экосистемы, других планет Солнечной Системы, экзопланет и тех далёких объектов и процессов во Вселенной (астрофизические объекты), которые приносят вклад во внешние воздействия на экосистему.

Всем этим вопросам посвящена ежегодная Конференция молодых учёных, приуроченная ко Дню космонавтики, которая проходит на базе ИКИ РАН уже 15 лет. Конференция собирает студентов и аспирантов со всей России, а также из других стран и является самой крупной молодёжной конференцией по космическим исследованиям. Тематика конференции очень широка и даёт возможность наладить междисциплинарные контакты.

Исследования, представляемые на конференции, условно разбиты на шесть основных направлений.

1. Астрофизика и радиоастрономия. В секцию вошли задачи и проблемы современной астрофизики: как экспериментальные, так и теоретические: наблюдение туманностей, двойных систем и нейтронных звёзд во всём спектре электромагнитного излучения.

2. Исследование планет. Секция посвящена изучению планет и их спутников, а также малых тел — комет и астероидов, как в Солнечной системе, так и у других звёзд. Тематика включала в себя два больших направления — исследование внутреннего строения планет (как землеподобных, так и газовых гигантов) и изучение планетных атмосфер. Доклады представляют весьма широкий спектр экспериментальных и теоретических методов, от изучения формирования планет до моделирования процессов, текущих в атмосферах.

3. Физика солнечной системы (солнечно-земная физика и физика гелиосферы). Это строение Солнца и гелиосферы (структура гелиосферы от ядра Солнца до границ гелиопаузы), солнечно-земные связи начиная с изучения солнечного ветра (его происхождения и ускорение, магнитные и электрические поля, кинетические параметры плазмы), до его воздействия на объекты солнечной системы, включая магнитосферу Земли и связанные с этим явления (от магнитных бурь и полярных сияний до молниевых разрядов).

4. Теория и моделирование физических процессов. В секцию вошли самые разнообразные научные вопросы: моделирование и расчёт в областях физики космической плазмы (плазменные неустойчивости, неустойчивости в плазменном слое и токовых слоях), астрофизики (аккреция вещества на массивные объекты, излучение, регистрация высокоэнергичных частиц), баллистики (включая проблемы взаимодействия спутников с космической плазмой).

5. Космическое приборостроение и эксперимент. Секция была посвящена моделированию, созданию и отработке аппаратуры, используемой в космическом эксперименте: датчиков различных типов, грунтозаборных механизмов, средств

связи и защиты, двигательных установок, систем сбора данных. Рассматривались как сами приборы, так и лабораторное оборудование, методы и технологии их создания. Отметим ещё, что с прошлого года в Конференции участвует ряд представителей различных предприятий Роскосмоса, в частности АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, АО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», г. Химки, ПАО «Научно-производственное объединение «Искра», г. Пермь и др. и представители профильных вузов, например, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и Самарский университет, что внесло свежую струю в представленные доклады.

6. Технологии спутникового мониторинга. Дистанционное зондирование Земли является одним из важнейших инструментов изучения поверхности нашей планеты. Большинство докладов было посвящено непосредственному прикладному применению спутникового мониторинга — изучению рельефа местности, видов растительности (включая агрокультуры), состава воды и воздуха на предмет загрязнений, локализации лесных пожаров и других стихийных бедствия. Предполагается обсуждение обработки полученной информации и связанных с этим задач (в частности — автоматизации и хранения). Следует отметить, что в настоящее время данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) все шире используются для количественной информации о различных объектах и территориях. Примерами такой информации являются, например, ряды ежегодно обновляющихся карт растительного покрова, пахотных земель, земель занятых различными видами посевов, базы данных наблюдений природных пожаров и т.д.

Основной целью Конференции является предоставление студентам, аспирантам и молодым учёным возможности отточить навыки публичного выступления перед большой аудиторией, а также принять участие в обсуждении научных результатов (как получить комментарии к своей работе, так и задать вопросы другим докладчикам). Конференция традиционно проходит в течение трёх дней, что позволяет познакомиться с исследованиями в разных областях космической физики. Это расширяет кругозор и положительно влияет на общий уровень подготовки молодых ученых, а также подводит базу для создания новых связей, как между отдельными научными сотрудниками, так и между целыми научными группами. Эти связи способствуют постановке новых целей и задач, приобретению опыта междисциплинарной работы.

Официальную информацию о Конференции можно найти на её сайте <http://kmi.cosmos.ru>, на котором проходит регистрация и подача докладов. В КМУ могут участвовать студенты, аспиранты и молодые учёные (до 35 лет), связавшие свою жизнь с космическими исследованиями.

В этом году на Конференции было представлено более 120 докладов от участников из разных концов России и СНГ. Поскольку в КМУ участвуют студенты, аспиранты и молодые учёные, то регистрационного взноса не предусматривается, а все расходы организаторы покрывают с помощью грантов (в этом году был получен грант РФФИ). Информационную поддержку обеспечивал журнал «Инженер и промышленник сегодня».

Следует ещё добавить, что в рамках КМУ впервые проходила однодневная секция школьных работ, проведение которой было поддержано Московским департаментом образования и Государственной корпорацией Роскосмос. На секции было представлено 23 работы детей из разных образовательных организаций, в основном, участниц и кандидатов на участие в проекте «Академический (научно-технологический) класс в московской школе». Его реализует Департамент образования города Москвы, московские школы и научные организации, подведомственные ФАНО. По результатам докладов были присуждены один диплом первой степени, два — второй и три — третьей.

Приглашаем к участию в наших мероприятиях всех интересующихся космическими исследованиями, а всю информацию о проводимых мероприятиях можно найти на сайте ИКИ РАН www.cosmos.ru.

А. М. Садовский

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ КОМЕТ C/1999 S4 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT), 67P/ЧУРЮМОВА – ГЕРАСИМЕНКО И ВОЗМОЖНЫЕ ОТЛИЧИЯ В СОСТАВЕ ИХ ВЕЩЕСТВА

В. В. Бусарев¹, Д. К. Полюшкина², А. Л. Зиманова²

¹ Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), физический факультет

В данной работе нами были повторно обработаны эшелле-спектры двух комет: C/1999 S4 и C/2001 Q4, полученные ранее в Шемахинской обсерватории 23 июля 2000 г. и 25 июня 2004 г., соответственно. Фотометрические условия при наблюдениях были хорошими, но комета C/1999 S4 наблюдалась при крайне больших воздушных массах со спектральным разрешением $R \approx 40000$, а комета C/2001 Q4 — с относительно низким спектральным разрешением $R \approx 14000$. Тем не менее, нам, вероятно, удалось идентифицировать флуоресцентные эмиссионные линии полициклических ароматических углеводородов и простейших молекул в спектрах обеих комет. Наши результаты хорошо согласуются с результатами других авторов и подтверждают существующие представления о природе комет. Также мы сравнили простейшие молекулы, обнаруженные в спектрах наших комет (C/1999 S4 и C/2001 Q4), с обнаруженными в комете 67P/Чурюмова – Герасименко (Ivanova et al., 2017) и дали интерпретацию возможных отличий.

Ключевые слова: спектроскопия комет, молекулярные эмиссионные линии, органические соединения

ВВЕДЕНИЕ

Как самые древние тела Солнечной системы, кометы несут информацию об условиях возникновения планет и, возможно, примитивной жизни. Но в большинстве случаев кометы — весьма удалённый для наблюдателя объект, поэтому многие данные о них получаются с помощью дистанционных (астрофизических) методов. Это касается и состава кометного ядра, который изучается по их спектрам излучения и отражения. Поверхность ядра кометы состоит в основном из частиц пыли, льда и небольшого количества органических веществ, в основном CHON. Об этом свидетельствует наличие в спектрах комет множества эмиссионных (люминесцентных) линий углерода, а также различных его соединений с водородом и другими летучими элементами — органических молекул.

Комета C/1999 S4 была случайно обнаружена 27 сентября 1999 г. телескопом LINEAR, используемым для поиска астероидов, сближающихся с Землёй (АСЗ) [Stokes et al., 2000]. Последующие наблюдения показали, что это, по-видимому, её первое прохождение через внутреннюю часть Солнечной системы.

Бусарев Владимир Васильевич — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, busarev@sai.msu.ru

Полюшкина Дарья Константиновна — студентка, darja_poliushkina@mail.ru

Зиманова Анна Львовна — студентка, anyazimanova@rambler.ru

Новые возможности для изучения этой кометы появились, когда в конце июля 2000 года, пройдя перигелий, комета распалась на части. Это позволило провести дополнительные подробные спектроскопические наблюдения кометы 1999 S4 и идентифицировать значительное количество соединений в её диспергированном веществе (например, [Churyumov et al., 2002; Mumma et al., 2001]). Основным выводом предшествующих исследований заключается в том, что вещество кометы обеднено наиболее летучими соединениями, такими как СО и CH_3OH [Bockelee-Morvan et al., 2001; Mumma et al., 2001]. В частности, пониженное содержание СО указывает, что комета образовалась в протопланетном диске при более высоких температурах, чем комета Хейла-Боппа [DiSanti et al., 1999], т.е. ближе к Солнцу, вероятно, в области Юпитера-Сатурна [Mumma et al., 2001].

Комета С/2001 Q4 была открыта 24 августа 2001 г. во время наблюдений за АСЗ рамках программы NEAT с использованием 1,2-метрового телескопа Palomar [Pravdo et al., 2001]. Такие орбитальные параметры кометы, как $1/a = 0,00071 \text{ а.е.}^{-1}$, эксцентриситет $e = 1,0006642$, $a = 0,00071 \text{ а.е.}$ и наклон $i = 99,6^\circ$ [Marsden, 2002], позволяют классифицировать её как динамически новую комету, которая впервые появилась в окрестностях Солнца. Выводы, сделанные на основе анализа поляриметрических данных кометы С/2001 Q4, говорят о том, что она имеет схожие свойства с кометой С/1996 В2 (Хякутакэ), образовавшейся в облаке Оорта [Ganesh et al., 2009].

Таким образом, кометы С/1999 S4 и С/2001 Q4 схожи в том, что они впервые появились в окрестностях Солнца и проявили высокую активность.

Комета 67P/Чурюмова–Герасименко была открыта 23 октября 1969 г. советским астрономом Климом Чурюмовым в Киеве на фотопластинках другой кометы — 32P/Комас Сола, снятых Светланой Герасименко в сентябре в Алма-Атинской обсерватории. Комета 67P/Чурюмова–Герасименко относится к классу короткопериодических комет и является членом семейства Юпитера. Как известно, эта комета успешно изучалась с помощью КА Rosetta Европейского космического агентства, а также наблюдалась на многих обсерваториях, в том числе на 6-метровом телескопе САО РАН.

1. ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ И ИХ ОБРАБОТКА

Комета С/1999 S4 (LINEAR)

Наблюдения были проведены с помощью эшелльного кудэ-спектрометра (размеры ПЗС-матрицы спектрометра: $530 \times 580 \text{ px}$), установленного на 2-метровом цейссовском рефлекторе Шемахинской астрофизической обсерватории Азербайджанской Академии Наук на горе Пиркули [Guliyev et al., 2001].

- Дата наблюдения: 23.07.2000 в UT = $19^{\text{h}}10^{\text{m}}$
- Спектральное разрешение: $R \sim 40\,000$
- Дисперсия: $\sim 4 \text{ \AA/mm}$
- Спектральный порядок: 40
- Спектральная область: $(4400\text{--}7000) \text{ \AA}$
- Время экспозиции: $\sim 1 \text{ ч}$
- Фотометрическая ошибка: $\sim 5\text{--}10 \%$

- Точность определения положения линии с помощью спектра сравнения: $\sim 0,5$ км/с ($< 0,01$ Å)

В качестве спектра сравнения использовался спектр дневного неба.

- Отношение сигнал/шум: $S/N = 40$
- Общая видимая звёздная величина: $m \sim 6$
- Воздушная масса: $\sim 4,182$
- Фазовый угол: $\varphi = 121,87^\circ$
- Геоцентрическое расстояние: $\Delta = 0,3751$ а. е.
- Расчётный доплеровский сдвиг линий: $kd = 1,000031$
- Скорость в геоцентрической СК: $V_0 = 9,3218587$ км/с

Комета C/2001 Q4 (Neat)

Наблюдения были проведены на тех же телескопе и оборудовании, что и комета C/1999 S4 [Микаилов и др. 2005].

- Дата наблюдения: 25.06.2004 г. в UT = 18^h37^m
- Разрешение: $R = 14\ 000$
- Дисперсия в красной области: $\sim 10,5$ Å/мм, в синей области спектра: ~ 6 Å/мм
- Ширина щели: 2,4 с
- Высота щели: 12 с, направление вдоль хвоста
- Спектральный порядок: 27 (72–98 порядки)
- Спектральная область: (4840–6670) Å
- Общая видимая звёздная величина: $m \sim 9,14$
- Воздушная масса: $\sim 1,792$
- Фазовый угол: $\varphi = 43,85^\circ$
- Геоцентрическое расстояние: $\Delta = 1,45307$ а. е.
- Расчётный доплеровский сдвиг линий: $kd = 1,000125$
- Скорость в геоцентрической СК: $V_0 = 37,5060520$ км/с

Повторная обработка спектральных данных комет C/1999 S4 и C/2001 Q4 включала в себя учёт эмиссионных линий ночного неба, исключение эмиссионных линий Солнца и, наконец, идентификацию эмиссионных линий, присущих кометной материи. Для обработки спектральных данных использовался программный пакет DECH20T [Галазутдинов, 1992]. Кроме того, мы использовали программный пакет IDL для приведение спектрального разрешения референтного солнечного спектра [Neckel, Labs, 1984] к спектральному разрешению спектра каждой кометы.

Идентификация эмиссионных линий в спектрах наших комет основывалась на результатах предыдущих спектральных исследований других комет, а также на лабораторных исследованиях флуоресцентных характеристик атомов, простейших молекул и более сложных органических соединений. Мы воспользовались полученными спектральными каталогами высокого разрешения комет Хейла-Боппа (C/1995 O1), 122/P де Вико и др. [Brown et al., 1996; Cochran, Cochran, 2002; Zhang et al., 2001] на основании предполагаемого сходства природы и происхождения таких тел на периферии ранней Солнечной

системы (например, [Шульман 1987; Delsemme, 1982; Mumma et al., 1993]). Другим важным источником справочной информации являются результаты лабораторных исследований возможных аналогичных образцов, включая такие низкотемпературные соединения, как льды и органические соединения (например, [Микаилов и др. 2005; Теплицкая и др., 1978; Ehrenfreund, Sephton 2006]). Фрагменты 40-го спектрального порядка нормированных эшелле-спектров комет C/1999 S4 (LINEAR) и C/2001 Q4 (NEAT) с исключённым континуумом и удалённым солнечным спектром показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

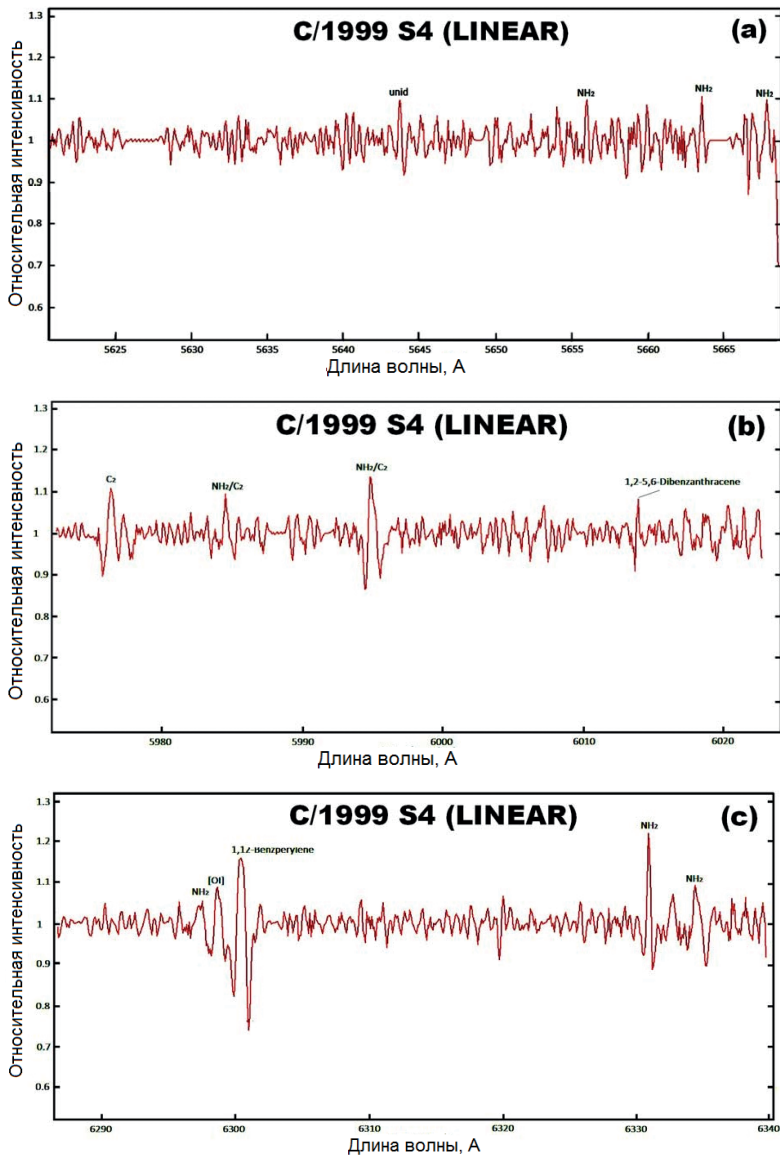


Рис. 1. Три фрагмента 40-го спектрального порядка нормированного эшелле-спектра кометы C/1999 S4 с исключённым континуумом и удалённым солнечным спектром

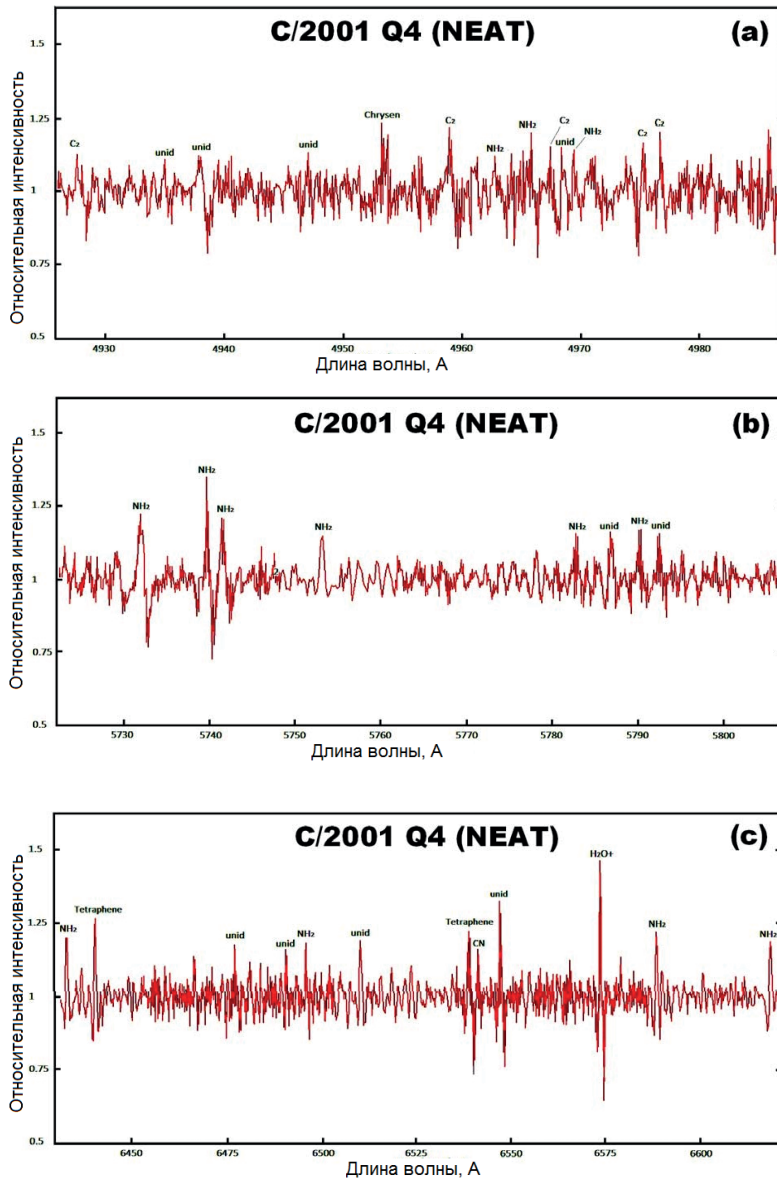


Рис. 2. Три фрагмента 40-го спектрального порядка нормированного эшелле-спектра кометы C/2001 Q4 с исключённым континуумом и удалённым солнечным спектром

Для идентификации линий были использованы два основных критерия. Во-первых, были исключены линии, точность определения которых по длине волны превышала их FWHM (полная ширина на уровне половинной амплитуды). Вычисленные средние FWHM для полученных спектров комет C/1999 S4 и C/2001 Q4 составляют 1,16 Å и 0,42 Å соответственно. Такие значения указывают, что, хотя комета C/1999 S4 наблюдалась с более высоким спектраль-

ным разрешением, она была на гораздо большем зенитном расстоянии, и качество её спектра оказалось хуже, чем у кометы C/2001 Q4. Не исключено, что по причине таких различий нам удалось найти и идентифицировать в целом больше органики в веществе C/2001 Q4 (табл. 1), чем у C/1999 S4 (табл. 2). Обозначения электронных переходов, колебательных и вращательных переходов приведены в таблицах в соответствии с принятой системой [Cochran, Cochran, 2002]. Во-вторых, был произведён отбор по интенсивности: для каждой кометы была идентифицирована самая слабая линия, значение её интенсивности бралось за σ , далее рассчитывалось значение 3σ — минимальное граничное значение интенсивности идентифицированной линии: для кометы C/1999 S4 $\sigma = 0,61 \%$, $3\sigma = 1,83 \%$ — линия C₂ (5908,006 Å по каталогу [Cochran, Cochran, 2002]), для кометы C/2001 Q4 $\sigma = 1,51 \%$, $3\sigma = 4,53 \%$ — линия NH₂ (5840,386 Å по каталогу [Cochran, Cochran, 2002]).

Таблица 1. Идентифицированные в веществе кометы C/2001 Q4 (NEAT) соединения

Wavelength (Å)	Molecule	Electronic transitions	Vibrational and/or rotational transitions	References
4850,939	Tryphenylene			Теплицкая и др., 1978
4858,521	Unid			
4899,551	Unid			
4927,898	C2	Swan	1--1	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(1,1)	Brown et al., 1996
4935	Unid			
4938,041	Unid			
4947,103	Unid			
4953,424	Chrysene			Теплицкая и др., 1978
4956,433	C2	Swan	0--0	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(0,0)	Brown et al., 1996
4959,065	C2	Swan	1--1	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(1,1)	Brown et al., 1996
4961,449	Unid			
4962,906	NH2	A-X	(0, 5,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,13,0)	Brown et al., 1996
	NH2		(0,13,0)	Zhang et al., 2001
4964,254	Unid			
4966,117	NH2	A-X	(0, 5,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,13,0)	Brown et al., 1996
4967,598	C2	Swan	1--1	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(1,1)	Brown et al., 1996
4968,461	Unid			
4969,54	NH2	A-X	(0, 5,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
4977,117	C2		(0,0)	Cochran, Cochran, 2002
4986,143	C2		(0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5013,502	Phenanthrene			Теплицкая и др., 1978
5028,452	Chrysene			Теплицкая и др., 1978

Wavelength (Å)	Molecule	Electronic transitions	Vibrational and/or rotational transitions	References
5032,542	Tetracene			Теплицкая и др., 1978
5033,811	C2	Swan	0--0	Cochran, Cochran 2002
	C2		(0,0)	Brown et al., 1996
5068,977	C2	Swan	3--3	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(3,3)	Brown et al. 1996
	C2		(3,3)	Zhang et al. 2001
5122,635	C2	Swan	1--1	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(1,1)	Brown et al. 1996
5158,893	Coronen			Теплицкая и др., 1978
5218,856	Tetracene			Теплицкая и др., 1978
5225,245	NH2	A-X	(0, 5,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5244,602	Unid			
5257,474	Unid			
5403,774	C2	Swan	1--2	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(2,3)	Brown et al. 1996
5527,504	C2	Swan	2--3	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(2,3)	Brown et al., 1996
	C2		(2,3)	Zhang et al., 2001
5552,137	C2	Swan	1--2	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(1,2)	Brown et al., 1996
5571,881	NH2	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	C2		(1,2)	Brown et al., 1996
5577,147	C2	Swan	1--2	Cochran, Cochran, 2002
	[OI]			Brown et al., 1996
	[OI]			Zhang et al., 2001
5600,651	Fluoranthene			Теплицкая и др., 1978
5653,601	Unid			
5663	Unid			
5693,844	NH2	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,10,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,10,0)	Cochran, Cochran, 2002
5703,517	NH2	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,10,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,10,0)	Cochran, Cochran, 2002
5708,712	NH2	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5732,14	NH2	A-X	(0, 3,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5739,919	NH2	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5741,611	NH2	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,9,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH2		(0,9,0)	Cochran, Cochran, 2002
5753,289	NH2	X-X	(1,10,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5782,855	NH2	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5783,079	Unid			
5786,961	NH2	A-X	(0, 3,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5790,171	C2	Swan	4--6	Cochran, Cochran, 2002

Wavelength (Å)	Molecule	Electronic transitions	Vibrational and/or rotational transitions	References
5792,337	NH ₂	A-X	(0, 3,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5809,803	C ₂	Swan	1--3	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(1,3)	Brown et al., 1996
5880,842	C ₂	Swan	0--2	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(1,3)	Brown et al., 1996
5922,819	C ₂	Swan	5--7	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(5,7)	Brown et al., 1996
5981,491	NH ₂	X-X	(0,12,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(0,2)	Brown et al., 1996
5995,007	NH ₂	A-X	(0, 4,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH ₂		(0,9,0)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(0,9,0)	Zhang et al., 2001
6010,589	C ₂	Swan	1--3	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(1,3)	Brown et al., 1996
6056,353	C ₂	Swan	2--4	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(2,4)	Brown et al., 1996
6072,658	NH ₂	A-X	(1, 1,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(1,3)	Brown et al., 1996
6077,524	C ₂		(1,3)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(0,9,0)	Zhang et al., 2001
6081,905	Fluoranthene			Теплицкая и др., 1978
6128,019	C ₂	Swan	0--2	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(0,2)	Brown et al. 1996
6131,061	C ₂		(0,2)	Brown et al. 1996
6131,791	C ₂	Swan	0--2	Cochran, Cochran, 2002
	C ₂		(0,2)	Brown et al. 1996
6141,767	Unid			
6158,315	H ₂ O ⁺	A-X	(0,3,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	H ₂ O ⁺		(0,8,0)–(0,0,0)	Brown et al., 1996
6167,684	C ₂		(0,2)	Brown et al., 1996
6245,523	CN		(4,0)	Brown et al., 1996
6249,638	Unid			
6335,19	Unid			
6355,936	CN	A-X	5--1	Cochran, Cochran, 2002
6395,369	Unid			
6401,198	Unid			
6432,473	NH ₂	X-X	(0,12,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
6440,138	Tetrafen			Теплицкая и др., 1978
6477,093	Unid			
6490,756	Unid			
6495,985	NH ₂	A-X	(1, 0,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
6539,091	Tetrafen			Теплицкая и др., 1978
6541,529	CN		(4,0)	Brown et al., 1996
6547,279	Unid			
6573,759	H ₂ O ⁺	A-X	(0,2,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002

Wavelength (Å)	Molecule	Electronic transitions	Vibrational and/or rotational transitions	References
6588,567	NH ₂	X-X	(0,11,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
6618,706	NH ₂	A-X	(0, 3,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH ₂		(0,7,0)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(0,7,0)	Zhang et al. 2001

Таблица 2. Идентифицированные в веществе кометы C/1999 S4 (LINEAR) соединения

Wavelength (Å)	Molecule	Electronic transitions	Vibrational and/or rotational transitions	References
5643,739	Unid			
5656,043	NH ₂	A-X	(1, 2,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5663,576	NH ₂	A-X	(1, 2,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5666,592	NH ₂	A-X	(1, 2,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5667,188	NH ₂		(1,2,0)	Brown et al., 1996
	NH ₂	A-X	(1, 2,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5804,238	NH ₂	A-X	(0, 3,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
5872,977	NH ₂		(1,6,0)	Zhang et al. 2001
	C ₂	Swan	6--8	Cochran, Cochran, 2002
5924,96	H ₂ O ⁺	A-X	(0,3,0)–(0,0,0)	Cochran and Cochran
5931, 854	Coronen			Теплицкая и др., 1978
5975,859	C ₂		(2,4)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(1,6,0)	Zhang et al. 2001
	C ₂	Swan	2--4	Cochran, Cochran, 2002
5984,622	NH ₂		(0,9,0)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(0,9,0)	Zhang et al. 2001
	C ₂	Swan	1--3	Cochran, Cochran, 2002
5994,585	NH ₂		(0,9,0)	Brown et al., 1996
	C ₂		(2,4)	Zhang et al. 2001
	C ₂	Swan	2--4	Cochran, Cochran, 2002
5995,604	NH ₂		(0,9,0)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(0,9,0)	Zhang et al., 2001
	C ₂	Swan	3--5	Cochran, Cochran, 2002
6013,737	1,2-5,6-Dibenzantracene			Теплицкая и др., 1978
6137,806	C ₂		(0,2)	Brown et al., 1996
6162,222	1,12- Benzperylene			Теплицкая и др., 1978
6299,239	NH ₂	X-X	(0,12,0)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH ₂		(0,8,0)	Brown et al., 1996
6299,894	[OI]			Cochran, Cochran, 2002
	[OI]			Brown et al., 1996
	[OI]			Zhang et al 2001
6301,016	1,12- Benzperylene			Теплицкая и др., 1978

Wavelength (Å)	Molecule	Electronic transitions	Vibrational and/or rotational transitions	References
6319,819	NH ₂	A-X	Pi(2)–(0,0,0)	Cochran, Cochran, 2002
	NH ₂		(0,8,0)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(0,8,0)	Zhang et al. 2001
6331,325	NH ₂		(0,8,0)	Brown et al., 1996
6335,301	NH ₂		(0,8,0)	Brown et al., 1996
	NH ₂		(0,8,0)	Zhang et al., 2001
6416,841	Unid			

Комета 67P/Чурюмова – Герасименко

Спектроскопические наблюдения кометы 67P/Чурюмова – Герасименко проводились на 6-метровом телескопе CAO РАН [Ivanova et al., 2017].

- Даты наблюдений: 08.11.2015 в UT = 1^h52^m, 09.12.2015 в UT = 2^h12^m, 03.04.2016 в UT = 21^h55^m
- Спектральные области: (3600–7100) Å (Δλ = 5 Å), (3500–5100) Å (Δλ = 4 Å), (3600–7100) Å (Δλ = 5 Å)
- Фазовые углы: φ = 33,2°, φ = 31,8°, φ = 10,4°
- Геоцентрические расстояния: Δ = 1,798 а.е., Δ = 1,721 а.е., Δ = 1,807 а.е.
- Гелиоцентрические расстояния: r = 1,615 а.е., r = 1,844 а.е., r = 2,723 а.е.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе анализа спектров комет нам удалось обнаружить эмиссионные линии простейших молекул и ионов, таких как C₂, NH₂ (идентифицированные по двум и более линиям), H₂O⁺, [OI] (идентифицированные по одной линии) в спектре кометы C/1999 S4 и C₂, NH₂, H₂O⁺, CN (идентифицированные по двум и более линиям), [OI] (идентифицированный по одной линии) в спектре кометы C/2001 Q4 (табл. 3). В то же время, в спектре кометы 67P/Чурюмова – Герасименко были обнаружены C₂, C₃, NH₂, CN, CO⁺ [Ivanova et al., 2017] (см. табл. 3). Но особое внимание было уделено полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ), которые широко распространены во Вселенной (например, [Allmandola, 1996; Kaneda et al., 2005; Pendleton, Allamandola, 2002]). Для поиска эмиссионных линий в имеющихся спектрах комет был использован каталог фотолуминесцентных эмиссионных линий, полученных Т.А. Теплицкой [Теплицкая и др., 1978] методом Шпольского [Шпольский, 1959]. Этот метод позволяет изучать тонкую структуру электронных флуоресцентных спектров органических соединений (включая ПАУ), возникающую при использовании парафиновых углеводородов в качестве растворителей ПАУ и охлаждении твёрдого раствора до температуры кипения азота (77 К). В результате вместо сплошных широких полос в спектрах люминесценции органических соединений, которые наблюдаются при комнатных температурах, образуется большое количество узких линий, по своей ширине приблизительно соответствующих ширине линии в спектрах комбинационного рассеяния,

что обеспечивает высокую точность идентификации линий (от 1 Å до десятых долей Å). Было высказано предположение [Simonia, 2007, 2011], что если ядра комет содержат замороженные смеси субмикронных частиц и алканов (насыщенных алифатических углеводородов или парафинов, простейшим из которых является CH_4) [Петров, 1974], то действует эффект Шпольского и фотолюминесцентные измерения Теплицкой и др. (1978) применимы для идентификации эмиссионных линий в спектрах комет. При указанном условии удалось идентифицировать 72 люминесцентные эмиссионные линии ПАУ в спектре кометы 153/Икея – Цанга [Simonia, 2011]. Возможно, что алканы, являющиеся предшественниками ПАУ и других более сложных органических веществ, в процессе низкотемпературных химических реакций Фишера – Тропша играли роль «растворителя» при формировании внутренней структуры кометных ядер в ранней Солнечной системе. Такая замороженная структура вещества может сохраняться при более высоких температурах на поверхности кометы при сближении с Солнцем, вплоть до сублимации или плавления ледяных соединений, что позволяет наблюдать тонкую эмиссионную структуру в кометном спектре.

Таблица 3. Сравнение идентифицированных в спектрах комет C/1999 S4, C/2001 Q4 и 67P/Чурюмова – Герасименко простейших молекул. Светло-серым цветом отмечены соединения, которые встречаются один раз, тёмно-серым — два раза и более

	C/1999 S4	C/2001 Q4	67P
C_2			
C_3			
NH_2			
CN			
CO^+			
H_2O^+			
[OI]			

Основываясь на лабораторных фотолюминесцентных измерениях [Теплицкая и др., 1978], нам удалось идентифицировать только три люминесцентных эмиссионных линий сложных ПАУ в спектре кометы C/1999 S4, а именно: 1,12-бензперилен ($\text{C}_{22}\text{H}_{12}$) (идентифицированный по двум линиям), коронен ($\text{C}_{24}\text{H}_{12}$) и 1, 2-5,6-дибензантрацен ($\text{C}_{24}\text{H}_{14}$) (идентифицированные по одной линии) (см. табл. 2) и семь в спектре кометы C/2001 Q4 — хризен ($\text{C}_{18}\text{H}_{12}$), тетрацен ($\text{C}_{18}\text{H}_{12}$), флуорантен ($\text{C}_{16}\text{H}_{10}$), тетрафен ($\text{C}_{18}\text{H}_{12}$) (идентифицированные по двум линиям), трифенилен ($\text{C}_{18}\text{H}_{12}$), фенантрен ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$) и коронен ($\text{C}_{24}\text{H}_{12}$) (идентифицированные по одной линии) (см. табл. 1).

ВЫВОДЫ

Спектроскопические данные каждой кометы и результаты их анализа уникальны и ценны, поскольку характеризуют условия происхождения не только данного тела, но и более широкой области протопланетного облака.

Кометы C/1999 S4 и C/2001 Q4 относятся к классу долгопериодических комет, в то время как комета 67P/Чурюмова–Герасименко относится к классу короткопериодических комет. Как упоминалось выше, вещество кометы C/1999 S4 обеднено наиболее летучими соединениями, такими как CO и CH₃OH, что, вероятно, свидетельствует о её образовании в области Юпитера–Сатурна [Bockelee-Morvan et al., 2001; Mumma et al., 2001]. В то же время сходство спектроскопических и поляриметрических свойств комет C/2001 Q4 и C/1996 B2 (Хякутакэ) [Ganesh et al., 2009; Weaver et al., 2004] позволяет сделать вывод о том, что комета C/2001 Q4 образовалась в более далёком и низкотемпературном транснептуновом регионе. Это согласуется с нашими результатами обнаружения в её веществе большого количества сложных ПАУ, хотя, как отмечалось выше, условия наблюдения C/2001 Q4 и C/1996 B2 не были идентичными. Несмотря на то, что комета 67P/Чурюмова–Герасименко является членом семейства Юпитера и уже многократно приближалась к Солнцу, она могла также образоваться значительно дальше от Солнца. Это возможно в случае, если она была некоторое время назад гравитационно захвачена Юпитером. На это указывает наличие в её веществе очень летучих соединений по данным КА Rosetta [Le Roy et al., 2015].

Мы подтверждаем наличие в спектрах комет C/1999 S4 и C/2001 Q4 эмиссионных линий таких простейших молекул и ионов, как C₂, NH₂, H₂O⁺, CN, которые были обнаружены в работах других авторов [Bockelee-Morvan et al., 2001; Churyumov et al., 2002; Ivanova et al., 2013; Mumma et al., 2001]. В комете 67P/Чурюмова–Герасименко были идентифицированы C₂, C₃, NH₂, CN, CO⁺ [Ivanova et al., 2017]. Возможно, что некоторые различия в составе рассмотренных нами комет (C/2001 Q4, C/1999 S4 и 67P/Чурюмова–Герасименко) обусловлены, во-первых, физическими условиями их формирования (например, [Шульман, 1987]), а также — особенностями их внутреннего строения и порядком сублимации летучих соединений при сближении с Солнцем.

Мы также вероятно обнаружили и идентифицировали эмиссионные линии трёх ПАУ (1,12-бензперилен, коронен и 1,2-5,6-добензантрацен) в спектре C/1999 S4 и семи ПАУ в спектре C/2001 Q4 (фенантрен, флуорантен, трифенилен, хризен, тетрафен, тетрацен, трифенилен и коронен), которые аналогичны тем, которые встречаются в спектрах других долгопериодических комет. Следует подчеркнуть, что почти половина соединений определена по двум эмиссионным линиям, что делает такие результаты более надёжными. В составе ледяного вещества кометы C/2001 Q4 могло сохраниться большее количество ПАУ по причине того, что она, вероятно, образовалась дальше от Солнца.

ЛИТЕРАТУРА

- [Галазутдинов, 1992] *Галазутдинов Г.А.* Система обработки звездных эшелле-спектров: препринт САО РАН 92 1992. С. 27–52.
- [Микаилов и др., 2005] *Микаилов Х. М., Халилов В. М., Алекберов И. А.* Эшелле-спектрометр фокуса кассегрена 2-метрового телескопа ШАО НАН Азербайджана // Циркуляр ШАО. 2005. № 109. С. 21–28.
- [Петров, 1974] *Петров А. А.* Химия алканов. М.: Наука, 1974. 243 с.

- [Теплицкая и др., 1978] *Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А., Вальдман М.М.* Атлас квазилинейчатых спектров люминесценции ароматических молекул. М.: Изд-во МГУ, 1978. 175 с.
- [Шпольский, 1959] *Шпольский Е.В.* Эмиссионный спектральный анализ органических соединений // *Успехи физ. наук.* 1959. Т. 68. С. 51–69.
- [Шульман, 1987] *Шульман Л.М.* Ядра комет. М.: Наука, 1987. 232 с.
- [Allmandola, 1996] *Allmandola L. J.* PAHs, They're Everywhere! // *The cosmic dust connection*/ ed. J. M. Greenberg. Kluwer Acad. Publishers, 1996. P. 81–102.
- [Bockelee-Morvan et al., 2001] *Bockelee-Morvan D., Biver N., Moreno R., Colom P., Crovisier J., Gerard E., Henry F., Lis, D. C., Matthews H., Weaver H. A., Womack M., Festou M. C.* Outgassing Behavior and Composition of Comet C/1999 S4 (LINEAR) During Its Disruption // *Science.* 2001. V. 292. P. 1339–1343.
- [Brown et al., 1996] *Brown M. E., Bouchez A. H., Spinrad H., Johns-Krull C. M.* A high-resolution catalogue of cometary emission lines // *Astron. J.* 1996. V. 112. P. 1197–1202.
- [Churyumov et al., 2002] *Churyumov K. I., Luk'yanyk I. V., Vlasyuk V. V., Borisov N. V.* Cometary Science after Hale-Bopp // *Earth, Moon and Planets.* 2002. V. 90. P. 141–146.
- [Cochran, Cochran, 2002] *Cochran A. L., Cochran W. D.* A high spectral resolution atlas of Comet 122P/de Vico // *Icarus.* 2002. V. 157. P. 297–308.
- [Delsemme, 1982] *Delsemme A. H.* Chemical composition of cometary nuclei // *Comets* / ed. L. L. Wilkening. Univ. of Arizona Press, 1982. P. 85–130.
- [DiSanti et al., 1999] *DiSanti M. A., Mumma M. J., Dello Russo N., Magee-Sauer K., Novak R., Rettigk T. W.* Identification of two sources of carbon monoxide in comet Hale-Bopp // *Nature.* 1999. V. 399. P. 662–665.
- [Ehrenfreund, Sephton, 2006] *Ehrenfreund P., Sephton M. A.* Carbon molecules in space: From astrochemistry to astrobiology // *Faraday Discuss.* 2006. V. 133. P. 277–288.
- [Ganesh et al., 2009] *Ganesh S., Joshi U. C., Baliyan K. S.* Optical polarimetry of Comet NEAT C/2001 Q4 // *Icarus.* 2009. V. 201. P. 666–673.
- [Guliyev et al., 2001] *Guliyev A. S., Churyumov K. I., Luk'yanyk I. V., Rozaev A. Kh., Mikhayilov Kh. M., Kleshhenok V. V.* // *Proc. Intern. Conf. "Nasiraddin Tusi and Modern Astronomy"*. ShAO, Azerbaijan. 2001. P. 152–159.
- [Ivanova et al., 2013] *Ivanova A. V., Korsun P. P., Borisenko S. A., Ivashchenko Y. N.* Spectral studies of comet C/2001 Q4 (NEAT) // *Solar Sys. Res.* 2013. V. 47. Iss. 2. P. 71–79.
- [Ivanova et al., 2017] *Ivanova O. V., Rosenbush V. K., Kiselev N. N., Afanasiev V. L., Korsun P. P.* Post-perihelion observations of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko at the 6 m BTA telescope: optical spectroscopy // *MNRAS.* 2017. DOI: 10.1093/mnras/stx1725.
- [Kaneda et al., 2005] *Kaneda H., Onaka T., Sakon I.* Detection of C_5N^- and vibrationally excited C_6H in IRC+10216 // *Astroph. J. Letters.* 2005. V. 632. P. L83–L86.
- [Le Roy et al., 2015] *Le Roy L., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J.* et al. Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/ROSINA // *Astron. and Astroph.* 2015. V. 583. id.A1. 12 p.
- [Marsden, 2002] *Marsden B.* // *Minor Planet Circulars.* 2002. 46619.
- [Neckel, Labs, et al., 1984] *Neckel H., Labs D.* The solar radiation between 3300 and 12500 Å // *Solar Physics.* 1984. V. 90. P. 205–258.
- [Mumma et al., 1993] *Mumma M. J., Weissman P. R., Stern S. A.* Comets and the origin of the solar system-Reading the Rosetta Stone // *Protostars and Planets III.* Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 1993. P. 1177–1252.
- [Mumma et al., 2001] *Mumma M. J., Dello Russo N., DiSanti M. A.* et al. Organic Composition of C/1999 S4 (LINEAR): A Comet Formed Near Jupiter? // *Science.* 2001. V. 292. P. 1334–1339.
- [Pendleton, Allamandola, 2002] *Pendleton Y., Allamandola L.* The Organic Refractory Material in the Diffuse Interstellar Medium: Mid-Infrared Spectroscopic Constraints // *Astroph. J.* 2002. Suppl. Ser. V. 138. P. 75–98.
- [Pravdo et al., 2001] *Pravdo S. H., Helin E. F., Lawrence K. J.* // *IAU Circ.* 2001. V. 1. 7695.

- [Simonia, 2007] *Simonia I.* On the nature of unidentified cometary emission lines // *Solar Sys. Res.* 2007. V. 41. Iss. 2. P. 129–131.
- [Simonia, 2011] *Simonia I.* Frozen hydrocarbons in comets // *Astron. J.* 2011. V. 141. P. 56–61.
- [Stokes et al., 2000] *Stokes G. H., Evans J. B., Vigghe H. E. M., Shelly F. C., Pearce E. C.* Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR) // *Icarus.* 2000. V. 148. Iss. 1. P. 21–28.
- [Weaver et al., 2004] *Weaver H. A., A'Hearn M. F., Arpigny C., Combi M. R., Feldman P. D., Festou M. C., Tozzi G.-P.* Detection of Deuterium Emission from C/2001 Q4 (NEAT) // *Bulletin of the American Astronomical Society.* 2004. V. 36. P. 1120.
- [Zhang et al., 2001] *Zhang H. W., Zhao G., Hu J. Y.* A catalogue of emission lines in spectra of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) // *Astron. and Astroph.* 2001. V. 367. P. 1049–1055.

COMPARISON OF THE SPECTRA OF COMETS C/1999 S4 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT), 67P/CHURYUMOVA — GERASIMENKO AND POSSIBLE DIFFERENCES IN THE COMPOSITION OF THEIR MATTER

V. V. Busarev¹, D. K. Poliushkina², A. L. Zimanova²

¹ Sternberg Astronomical Institute Moscow State University (SAI MSU)

² Lomonosov Moscow State University, Physical Department (MSU)

In this paper, we re-processed spectroscopic echelle data on comets 1999 S4 (LINEAR) and 2001 Q4 (NEAT) obtained previously in Shamakhi Observatory on July 23, 2000 and June 25, 2004, respectively. Photometric conditions at the comets' observations were good but measurements of the spectra for the first one were performed at a large zenith distance with spectral resolution $R \approx 40\,000$ and the second — with a relatively low spectral resolution $R \approx 14\,000$. Nevertheless, we possibly succeeded in detection and identification of fluorescent emission lines of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and simpler molecules in the spectra of both comets. Our results are in accordance with those of other authors and substantiate present notions about nature of the comets. Also, we compared simpler molecules found in the spectra of our comets (C/1999 S4 and C/2001 Q4), with those found in the spectra of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko (Ivanova et al., 2017) and gave an interpretation of possible differences.

Keywords: spectroscopy of comets, molecular emission lines, organic compounds

Busarev Vladimir Vasilevich — leading researcher, doctor of physical and mathematical sciences, busarev@sai.msu.ru

Poliushkina Daria Konstantinovna — student, daria_poliushkina@mail.ru

Zimanova Anna Lvovna — student, anyazimanova@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КАНДИДАТА В ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ GRS1739-278 ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ 2014 ГОДА

Быков С. Д.^{1,2}, Филиппова Е. В.¹, Мереминский И. А.¹, Семена А. Н.¹

¹ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ), Москва, Россия

В работе исследованы свойства рентгеновской новой GRS1739-278 во время вспышки 2014 г. По данным обсерваторий SWIFT и INTEGRAL показано, что за время вспышки система перешла из низкого/жесткого состояния через промежуточные жесткое и мягкое состояния в высокое/мягкое состояние. На основе стандартной спектральной модели были получены оценки на параметры аккреционного диска и их эволюцию во время вспышки. Были построены диаграммы зависимости жесткости от потока и жесткости от мощности переменности во время вспышки, на которых источник продемонстрировал характерные зависимости: “q”-форму на первой диаграмме и уменьшение мощности переменности с уменьшением жесткости излучения на второй. Во время нахождения источника в промежуточных жестком и мягком состояниях в спектрах мощности были найдены квазипериодические осцилляции на частотах 0,4–5 Гц. В работе также проведено сравнение параметров системы, полученных во время всех зарегистрированных на сегодня вспышек (1996, 2014, 2015, 2016 гг.).

Ключевые слова: аккреция, аккреционные диски, двойные звёзды, чёрные дыры

ВВЕДЕНИЕ

Во время вспышек транзиенты с кандидатами в чёрные дыры демонстрируют несколько характерных спектральных состояний. Для их классификации используют диаграммы «жесткость – поток» и «жесткость – переменность», на которых системы, как правило, демонстрируют характерные зависимости [Belloni, 2010; Belloni, Motta, 2016; Remillard, McClintock, 2006].

Изначально было открыто два состояния — низкое/жесткое и высокое/мягкое.

В низком/жестком состоянии в энергетическом спектре источника доминирует степенной закон с наклоном (называемым фотонным индексом) $\Gamma < 2$. В низком/жестком состоянии источник демонстрирует высокую мощность переменности (до 50 %), также в спектре мощности могут регистрироваться квазипериодические осцилляции (КПО) [Remillard, McClintock, 2006].

Высокое/мягкое состояние характеризуется доминирующим вкладом в поток от аккреционного диска (о его свойствах см. статью [Shakura, Sunyaev, 1973]), наклон степенного закона Γ , обычно более мягкий, чем в жестком состоянии ($\Gamma_{soft} > \Gamma_{hard}$), а спектр мощности переменности (фурье-спектр кривой блеска) зачастую не имеет особенностей в виде КПО, либо КПО выражены слабо, и мощность переменности источника мала (несколько процентов).

Быков Сергей Дмитриевич — старший лаборант, komisar95@gmail.com

Филиппова Екатерина Владимировна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Мереминский Илья Александрович — инженер, кандидат физико-математических наук

Семена Андрей Николаевич — младший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Переход в мягкое состояние ассоциируется с уменьшением внутреннего радиуса аккреционного диска вплоть до последней устойчивой орбиты (см. [Belloni, Motta, 2016]).

Последующие исследования показали, что между всеми признанными состояниями система может находиться в переходных [Belloni, 2010; Remillard, McClintock, 2006]. Примером такого состояния является промежуточное состояние, которое характеризуется наличием как тепловой, так и степенной компоненты, которая обычно более мощная, чем при высоком/мягком состоянии. Считается, что во время вспышки система должна переходить от низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние и обратно, проходя промежуточные стадии и демонстрируя характерную “q”-форму на диаграмме «жесткость – поток» [Belloni, 2010; Remillard, McClintock, 2006; Belloni, Motta, 2016]. Однако многие системы с кандидатами в чёрные дыры демонстрируют так называемые «провалившиеся» вспышки, когда система не доходит до высокого/мягкого состояния и не демонстрирует гистерезис [Ferrigno et al., 2012; Filippova et al., 2014; Del Santo et al., 2016; Mereminskiy et al., 2017].

Для дальнейшего развития модели вспышек двойных систем с кандидатами в чёрные дыры необходимо подробное исследование транзиентных систем, демонстрирующих несколько вспышек, и сравнение вспышек между собой.

Рентгеновский источник GRS 1739-278 был обнаружен обсерваторией GRANAT 18 марта 1996 г. Поток от источника составил 80 мКраб^1 в диапазоне энергий 40–75 кэВ [Paul et al., 1996], кривая блеска вспышки 1996 г. в диапазоне энергий 2–12 кэВ характеризовалась квазиэкспоненциальным спадом после пика (максимальный поток был равен примерно 1 Краб).

Во время вспышки 1996 г. система перешла из низкого/жесткого в сверх-высокое состояние (одно из промежуточных состояний), а затем и в высокое/мягкое состояние. Спектр низкого/жесткого состояния имел вид степенного закона с фотонным индексом ($\Gamma = 1,5-2,6$). Во время высокого состояния спектр описывался поглощённым степенным законом и дисковой компонентой, которая имела следующие параметры: внутренний радиус диска $R_{in} \sqrt{\cos i} \approx 20 \text{ км}$ (R_{in} — внутренний радиус диска; i — угол наклона диска к картинной плоскости), температура на этом радиусе $T_{in} \approx 0,7-1,2 \text{ кэВ}$. При анализе кривой блеска, построенной в диапазоне энергий 2–12 кэВ, у источника были обнаружены квазипериодические осцилляции на частоте 5 Гц [Borozdin, Trudolyubov, 2000].

Вторая по счёту вспышка, подробно исследуемая в этой работе, была задетектирована телескопом SWIFT/BAT 9 марта 2014 г. [Krimm et al., 2014]. Частично спектральный анализ этой вспышки был проведён в работе [Yan, Yu, 2017]. 26 марта источник попал в поле зрения обсерватории NuSTAR [Miller et al., 2015].

Через 200 дней после этой вспышки от системы были зарегистрированы две мини-вспышки (максимальный поток в диапазоне энергий 15–50 кэВ составил $\sim 30 \text{ мКраб}$), анализ поведения системы был сделан в работе [Yan, Yu, 2017], где было показано, что за время мини-вспышек система перешла из низкого/жесткого состояния в высокое/мягкое и вернулась обратно в низкое/жесткое.

¹ 1 Краб = $2 \cdot 10^{-8} \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$.

Следующая вспышка наблюдалась в сентябре 2016 г. По наблюдениям обсерваторий INTEGRAL и SWIFT, в работе [Mereminskiy et al., 2017] было обнаружено, что во время вспышки система была в низком жёстком состоянии и не продемонстрировала переход в высокое состояние. Было зарегистрировано некоторое умягчение спектра — фотонный индекс Γ увеличился с 1,73 в начале вспышки до 1,86 в максимуме потока, при этом степенной закон наблюдался вплоть до энергий ~ 150 кэВ без завалов, вклад в излучение от аккреционного диска не был задетектирован. Кривая блеска в энергетическом диапазоне 20–60 кэВ показала относительно долгий подъём, плоский максимум и быстрый спад.

В настоящей работе была исследована спектральная эволюция и временная переменность системы во время вспышки 2014 г., а также проведён сравнительный анализ поведения системы во всех задетектированных на сегодняшний день вспышках.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Система GRS1739-278 наблюдалась телескопом SWIFT/XRT в тайминговом оконном режиме (windows-timing mode) [Burrows et al., 2005] с 2014.03.20 (56736 MJD), т.е. на следующий день после сообщения в ATel [Krimm et al., 2014], по 2014.11.01 (56962 MJD). Всего было проведено 42 наблюдения (под номерами 000332030XY — далее используем две последние цифры номера наблюдения, номера 18 и 33 исключены из-за плохого качества данных). Кривые блеска и спектры источника получены с помощью онлайн-сервиса [Evans et al., 2007].

При аппроксимации спектров использовалась χ^2 -статистика (пакет Xspec [Arnaud, 1996]). Кривая блеска источника по данным телескопа BAT/SWIFT была получена из базы данных BAT (<https://SWIFT.gsfc.nasa.gov/results/transients/weak/GRS1739-278/>). В работе были использованы данные телескопов JEM-X и ISGRI/IBIS, обработанные с помощью сервиса HEAVENS [Walter et al., 2010].

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Кривая блеска

На рис. 1. показана кривая блеска источника, полученная по данным телескопов SWIFT/XRT и SWIFT/BAT во время вспышки 2014 г. в энергетических диапазонах 0,5–10 и 15–50 кэВ соответственно. На рисунке видно, что в диапазоне энергий 15–50 кэВ поток от источника достиг максимума $\sim 0,3$ Краб через ~ 10 дней от начала вспышки, затем за 5 дней он упал в 1,5 раза и был примерно на постоянном уровне в течение 10–20 дней. Потом началась вспышечная активность.

В диапазоне чувствительности XRT (0,5–10 кэВ) вспышка достигла максимума через 40 дней после начала наблюдений, однако вспышечная активность началась через 15 дней после начала. По окончании вспышечной активности, через 125 дней после начала вспышки, поток вышел на постоянный уровень, после чего начал падать.

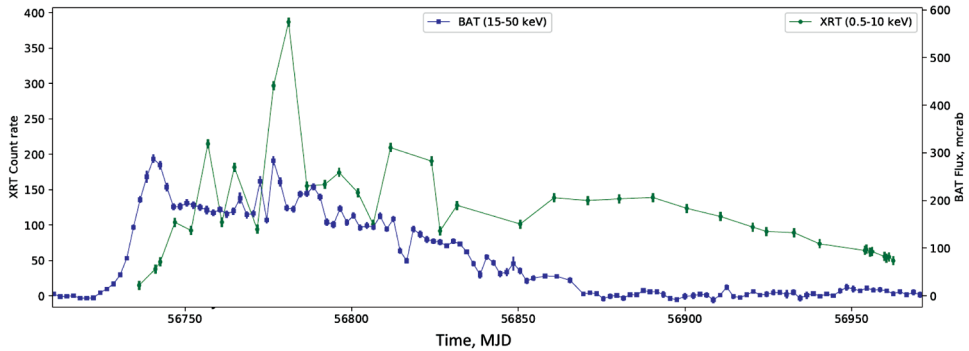


Рис. 1 Кривая блеска вспышки 2014 г. по данным XRT и BAT. Голубыми квадратами показан поток BAT (в мКраб, усреднение за два дня), зелёными точками — поток XRT (в отсчётах в секунду, усреднение по наблюдениям)

Энергетический спектр

Во время наблюдений 01, 03, 05, 07 и 09 обсерватории SWIFT/XRT источник наблюдался инструментами JEM-X и IBIS/ISGR1 спутника INTEGRAL. Мы использовали эти данные как квазиодновременные (с добавлением кросс-калибровочных констант) и исследовали форму совместных широкополосных спектров (в энергетическом диапазоне 0,8–100 кэВ). При описании мы использовали модель phabs*cutoffpl из пакета Xspec.

Таблица 1. Широкополосные модели: XRT и INTEGRAL

Номер наблюдения XRT	MJD ^а	C_{JEM-X} ^б	C_{XRT} ^в	N_H , 10^{-22} см ⁻² г	E_{cut} , кэВ ^д	Γ ^е	χ^2_{red}/dof ^ж
01	56742	$0,49^{+0,08}_{-0,07}$	$1,06^{+0,33}_{-0,25}$	$1,92^{+0,29}_{-0,27}$	$110,8^{+84,0}_{-33,3}$	$1,53^{+0,18}_{-0,17}$	1,22/43
03	56742	$0,73^{+0,05}_{-0,05}$	$1,39^{+0,11}_{-0,11}$	$1,61^{+0,04}_{-0,04}$	$21,0^{+1,0}_{-1,0}$	$1,22^{+0,03}_{-0,03}$	1,16/681
05	56751	$0,80^{+0,08}_{-0,08}$	$1,77^{+0,17}_{-0,15}$	$1,84^{+0,03}_{-0,03}$	$36,0^{+4,7}_{-3,9}$	$1,81^{+0,03}_{-0,03}$	1,52/721
07	56761	$0,64^{+0,03}_{-0,03}$	$1,53^{+0,10}_{-0,09}$	$2,16^{+0,03}_{-0,03}$	$38,7^{+0,3}_{-0,3}$	$2,04^{+0,03}_{-0,03}$	1,41/688
09	56771	$0,65^{+0,05}_{-0,05}$	$1,20^{+0,10}_{-0,09}$	$1,96^{+0,03}_{-0,03}$	$37,5^{+4,5}_{-3,7}$	$1,98^{+0,03}_{-0,03}$	1,23/679

Примечания: ^а — дата наблюдения (Модифицированная юлианская дата); ^{б, в} — константы кросс-калибровки инструментов INTEGRAL/JEM-X и SWIFT/XRT; ^г — уровень межзвёздного поглощения; ^д — энергия завала степенного закона; ^е — фотонный индекс; ^ж — значение приведённой статистики χ -квадрат и количество степеней свободы.

Результаты аппроксимации совместных спектров приведены в табл. 1. Спектр аппроксимировался степенной компонентой с завалом на высоких энергиях и поглощением на низких энергиях со следующими параметрами

наилучшей аппроксимации: фотонный индекс варьировался в пределах 1,2–2, энергия завала 20–60 кэВ, поглощение на луче зрения $N_H \approx (1,8-2) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Не смотря на то, что обычно завал в спектре присутствует на энергиях ≥ 50 кэВ (см. работы [Fabian et al., 2015; Belloni, Motta, 2016]), для нашего источника мы наблюдали завалы на энергиях порядка 20–40 кэВ.

В остальных наблюдениях вспышки были доступны только данные SWIFT/XRT. Чтобы выполнить поставленные цели по выделению спектральных компонент, для начала мы аппроксимировали все данные моделью *phabs*powerlaw*. В наблюдениях 11, 17, 19, 22–41 отмечено несоответствие такой модели данным: качество аппроксимации в этих случаях имело значения $\chi^2/dof = 1,8$ и выше либо слишком мягкий фотонный индекс, поэтому мы сделали предположение, что в такой модели не хватает тепловой компоненты *diskbb*.

Таблица 2. Параметры моделей по данным XRT (часть 1)

Номер наблюдения XRT	MJD	$N_H, 10^{-22} \text{ см}^{-2}$	Γ	$T_{in}, \text{ кэВ}$	$R_{in}, \text{ км}$	χ^2_{red}/dof	Экспозиция XRT, с
10	56776	$2,1^{+0,12}_{-0,12}$	$1,7^{+0,24}_{-0,4}$	$1,33^{+0,1}_{-0,06}$	$12,76^{+2,11}_{-2,37}$	0,95/667	1507
		$2,35^{+0,06}_{-0,06}$	2,2	$1,62^{+0,04}_{-0,05}$	$7,77^{+0,51}_{-0,54}$	0,97/668	
		$2,25^{+0,05}_{-0,05}$	2,0	$1,45^{+0,06}_{-0,06}$	$9,78^{+0,55}_{-0,50}$	0,95/668	
11	56781	$2,27^{+0,19}_{-0,16}$	$2,36^{+0,52}_{-0,43}$	$1,6^{+0,08}_{-0,09}$	$12,27^{+1,55}_{-1,04}$	0,96/664	1922
		$2,21^{+0,06}_{-0,06}$	2,2	$1,56^{+0,03}_{-0,03}$	$12,8^{+0,40}_{-0,41}$	$2,21^{+0,06}_{-0,06}$	
		$2,28^{+0,07}_{-0,07}$	2,4	$1,6^{+0,02}_{-0,02}$	$12,18^{+0,48}_{-0,50}$	$2,28^{+0,07}_{-0,07}$	
		$2,18^{+0,04}_{-0,04}$	2,4	$1,58^{+0,11}_{-0,09}$	$3,26^{+0,60}_{-0,67}$	$2,18^{+0,04}_{-0,04}$	
17	56811	$1,81^{+0,06}_{-0,05}$	$1,03^{+0,65}_{-1,67}$	$1,31^{+0,06}_{-0,03}$	$12,67^{+0,54}_{-0,82}$	$1,81^{+0,06}_{-0,05}$	2045
		$2,0^{+0,05}_{-0,05}$	2,2	$1,39^{+0,03}_{-0,03}$	$10,28^{+0,31}_{-0,3}$	$2,0^{+0,05}_{-0,05}$	
		$2,06^{+0,06}_{-0,06}$	2,4	$1,44^{+0,02}_{-0,02}$	$9,68^{+0,33}_{-0,34}$	$2,06^{+0,06}_{-0,06}$	
19	56823	$1,8^{+0,05}_{-0,05}$	$1,03^{+0,56}_{-1,2}$	$1,28^{+0,05}_{-0,03}$	$11,44^{+0,46}_{-0,60}$	$1,8^{+0,05}_{-0,05}$	2355
		$2,0^{+0,04}_{-0,04}$	2,2	$1,35^{+0,03}_{-0,03}$	$9,16^{+0,27}_{-0,26}$	$2,0^{+0,04}_{-0,04}$	
		$2,06^{+0,05}_{-0,05}$	2,4	$1,4^{+0,02}_{-0,02}$	$8,52^{+0,27}_{-0,28}$	$2,06^{+0,05}_{-0,05}$	
20	56826	$2,29^{+0,1}_{-0,1}$	$2,29^{+0,13}_{-0,14}$	$1,05^{+0,33}_{-0,13}$	$7,79^{+3,99}_{-4,00}$	$2,29^{+0,10}_{-0,10}$	1922
		$2,36^{+0,04}_{-0,04}$	2,4	$1,3^{+0,11}_{-0,14}$	$4,38^{+0,81}_{-0,83}$	$2,36^{+0,04}_{-0,04}$	
		$2,08^{+0,04}_{-0,05}$	2,2	$1,16^{+0,02}_{-0,02}$	$16,0^{+0,6}_{-0,4}$	$2,08^{+0,04}_{-0,05}$	

Далее проведено исследование модели *phabs* (powerlaw + diskbb)*, результаты представлены в табл. 2. Целью этой таблицы было показать, как данные описываются моделями с разными показателями фотонного индекса, которые характерны для спектра рентгеновских транзиентов с чёрными дырами

в высоком/мягком и промежуточном высоком/мягком состояниях, а именно, $\Gamma = 2.2; 2.4^1$ (в наблюдениях 15 и 20 значение Γ , близкое к 2,2, было получено сразу же). Мы так же записали в таблицу результаты аппроксимации данных моделью, в которой фотонный индекс был свободным параметром.

В наблюдениях 11, 17, 19, 22, 23 видно, что, при варьировании фотонного индекса в физически обоснованных для мягкого/промежуточного состояния границах, параметр внутренней температуры диска (параметр T_{in} модели *diskbb*) меняется слабо. Это говорит о том, что в данных наблюдениях дисковая компонента спектра доминирует над степенной, и поэтому её основной параметр — внутренняя температура T_{in} — слабо зависит от параметров степенной компоненты.

Противоположная ситуация присутствует в практически всех других наблюдениях (например, в наблюдении 10). При изменении фотонного индекса сильно изменяется параметр внутренней температуры диска, и на основании этого можно предположить, что в таком случае дисковая компонента не является доминирующей и имеющегося диапазона энергий не достаточно, чтобы надёжно определить параметры степенного закона, следовательно, и параметры дисковой компоненты.

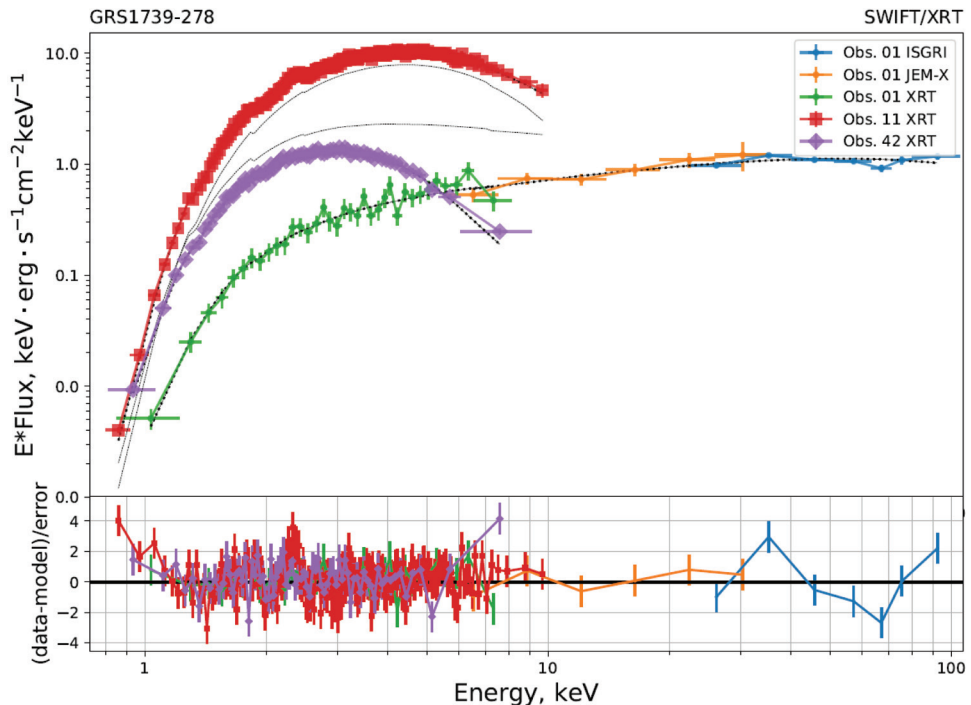


Рис. 2 Спектры источника и модели наилучшей аппроксимации во время разных состояний: 01 (низкое/мягкое состояние) — кружки, 11 (промежуточное высокое/мягкое состояние) — красные квадраты и 42 (высокого/мягкое состояние) — фиолетовые ромбы

¹ В наблюдениях 15 и 20 значение Γ , близкое к 2.2, было получено сразу же.

Мы отметили, что в наблюдениях с 24 до 42 спектры описываются только поглощённой дисковой компонентой, а вклад степенной составляющей (powerlaw) в общий спектр пренебрежимо мал. Температура диска в этих наблюдениях лежит в пределах 0,9–1,2 кэВ, а видимый радиус диска 15–18 км.

Таблица 3. Параметры моделей по данным XRT (часть 2)

Номер наблюдения XRT	MJD	N_H , 10^{-22} см $^{-2}$	T_{in} , кэВ	R_{in} , км	χ^2_{red}/dof	Экспозиция XRT, с
24	56870	$1,98^{+0,03}_{-0,03}$	$1,2^{+0,01}_{-0,01}$	$15,39^{+0,36}_{-0,35}$	0,84/575	1326
...
42	56962	$1,75^{+0,04}_{-0,04}$	$0,93^{+0,01}_{-0,01}$	$16,63^{+0,67}_{-0,64}$	0,97/405	809

Характерные спектры источника (полученные во время 01, 11 и 42 наблюдений) представлены на рис. 2. Эти спектры описываются моделями поглощённого степенного закона, диска со степенным законом и только диска соответственно, и отвечают типичным спектрам низкого/жёсткого, промежуточного и высокого/мягкого состояний соответственно.

Временная переменность

Мы провели анализ временной переменности источника на основе кривых блеска, построенных по данным телескопа XRT, в диапазоне энергий 0,5–10 кэВ, при этом использовалось разрешение 0,01 с (частота до 50 Гц). В нескольких наблюдениях (с 03 по 09) были обнаружены квазипериодические осцилляции, КПО.

Описывались модели спектра мощности методом максимального правдоподобия (см. [Vikhlinin et al., 1994]). В качестве модели была выбрана композиция из константы (отвечающей пуассоновскому шуму счёта фотонов), профиля Лоренца с нулевой центральной частотой (в качестве широкополосного шума источника, подложки) и профиля Лоренца с частотой, отвечающей частоте КПО. Такая модель хорошо описывает спектры мощности кандидатов в чёрные дыры в низком/жёстком состоянии [Belloni, 2010; Belloni, Motta, 2016].

При описании модели оценивались параметры профиля Лоренца, отвечающего за КПО, и определялся их тип (В или С) [Belloni, Motta, 2016].

К КПО типа С мы отнесли КПО наблюдения 03 (рис. 3), а к КПО типа В — все остальные найденные. Например, в наблюдении 03 мощность КПО составляет примерно 11 % при полной мощности переменности порядка 26 %, а в наблюдении 04 мощность КПО составляет ~10 %, но вот полная переменность излучения — 13 %. Была обнаружена зависимость частоты КПО от потока в энергетическом диапазоне 0,5–10 кэВ.

Зависимость полной переменности излучения в исследуемом частотном диапазоне 0,01–25 Гц от потока в том же диапазоне энергий приведена на рис. 4 (нижняя панель).

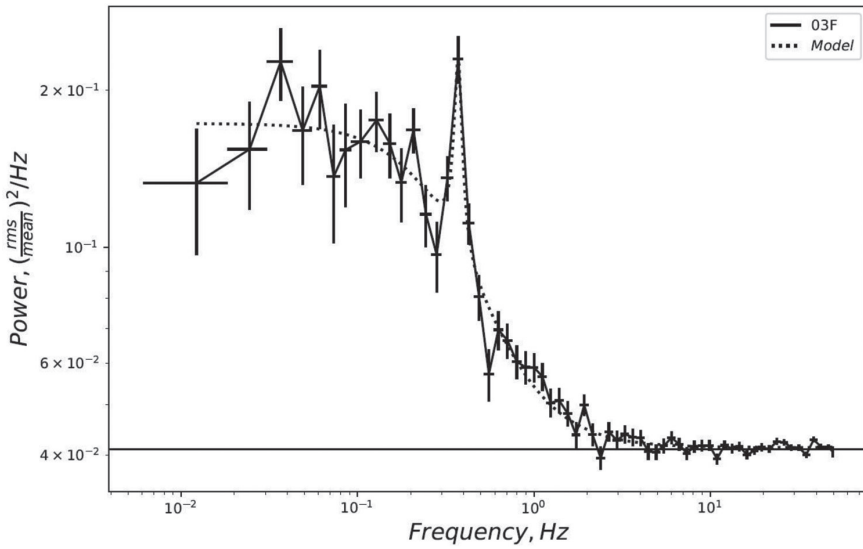


Рис. 3. Репрезентативный спектр мощности переменности в диапазоне 0,5–10 кэВ (наблюдение 03). Чёрными точками отмечен сам спектр мощности, пунктирная линия — модель, состоящая из двух профилей Лоренца и константы. Уровень Пуассоновского шума не вычтен

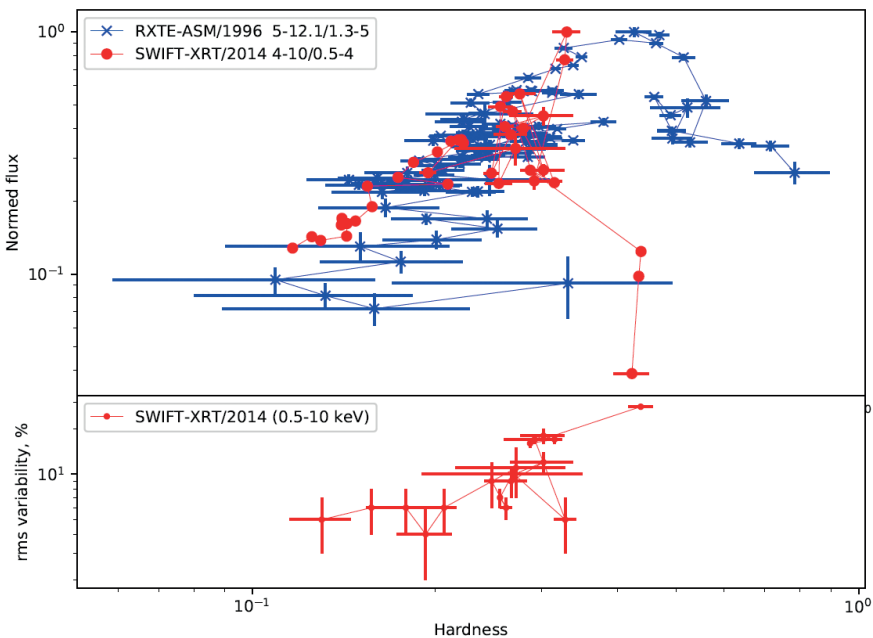


Рис. 4. Диаграмма «жёсткость – поток» для двух больших вспышек 1996 и 2014 гг. по данным RXTE и SWIFT (верхняя панель). По оси абсцисс отложены значения отношения скорости отсчёта в разных диапазонах согласно подписям в верхнем левом углу графика, по оси ординат — полные отсчёты, нормированные на максимум потока. Эволюция во времени происходит против часовой стрелки, начиная с нижнего левого угла

Также мы провели исследование спектров мощности системы во время мини-вспышек по данным XRT, но не обнаружили квазипериодических осцилляций, лишь отметили изменение уровня переменности излучения согласно спектральным состояниям [Yan, Yu, 2017].

ЭВОЛЮЦИЯ ВСПЫШЕК СИСТЕМЫ GRS1739-278 в 1996, 2014, 2015 и 2016 гг.

Спектральные параметры системы GRS 1739-278, полученные во время всех зарегистрированных вспышек, приведены в табл. 4. Из таблицы видно, что параметры аккреционного диска и фотонный индекс степенной компоненты от вспышки к вспышке менялись не сильно. Мы исследовали архивные данные RXTE/ASM и построили диаграмму «жесткость – поток» для вспышки 1996 г., а так же сравнили с такой диаграммой вспышки 2014 г. (рис. 5), предварительно пронормировав значения «поток» на их максимум. Несмотря на то, что кривые имеют схожую форму, на рисунке видно, что во время начала вспышки 2014 г. источник был мягче, чем во время вспышки 1996 г.

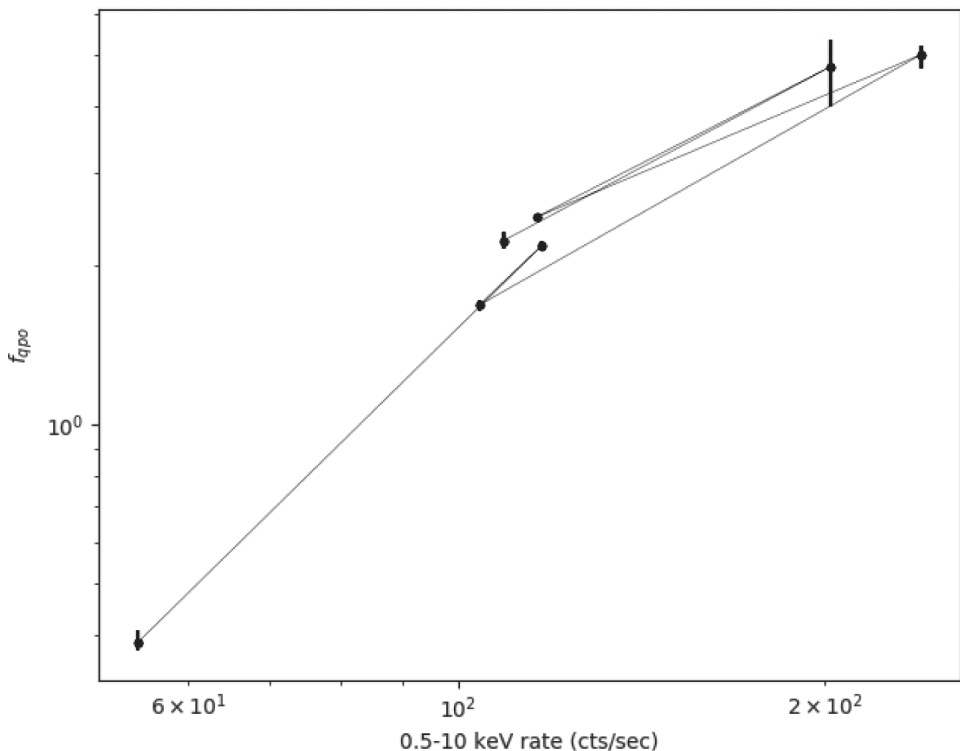


Рис. 5 Зависимость частоты КПО от потока по данным XRT (0,5–10 кэВ)

Таблица 4. Сравнение вспышек источника

Вспышка: год, ссылка	Поток (мКраб) в максимуме вспышки в диапазоне: а) 1–10 кэВ; б) 15–15 кэВ	Внутренняя температура диска, кэВ (мягкое состояние)	Фотонный индекс (жесткое состояние)	Особенности спектра мощности
1996, [Trudolyubov et al., 2001]	а) ~1000	0,7–1,2	1,5–2	5 Гц КПО в высоком состоянии
2014, эта работа	а) ~500 б) ~300	0,9–1,6	1,2–2	КПО 0,4–5 Гц в жёстком состоянии
2015, [Yan, Yu, 2017]	а) ~50 б) ~30	0,8	1,5–2	не обнаружены
2016, [Mereminskiy et al., 2017]	а) <10 б) ~30	Диск не детектирован	1,9	не обнаружены

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ спектральной и временной эволюции системы GRS1739-278 во время вспышки 2014 г. показал, что система перешла из низкого/жёсткого в высокое/мягкое состояние, продемонстрировав все необходимые атрибуты этого перехода.

По построенным спектрам мощности переменности была оценена мощность переменности для всех наблюдений во всём частотном интервале (см. рис. 4). Как и ожидается от подобных систем, мощность переменности в течение вспышки уменьшилась в 30 % до 5 %. Так же в начале вспышки (наблюдения 03–09) в спектре мощности наблюдались КПО на частотах 0,4–5 Гц.

Так же замечена положительная корреляция между частотой КПО и потоком в диапазоне 0,5–10 кэВ (см. рис. 5). Подобное поведение на стадии развития или затухания вспышки замечено в таких системах как SWIFT J174510.8-262411 [Prosvetov, Grebenev, 2015] и 4U 1630-47 [Trudolyubov et al., 2001]. Корреляция частоты КПО с потоком в мягком рентгеновском диапазоне (до 10 кэВ) может говорить о связи КПО с кеплеровской частотой на внутренней части аккреционного.

В диапазоне энергии 15–50 кэВ максимальные потоки от источника были 300 и 30 мКраб для большой вспышки 2014 г. и сорванной вспышки 2016 г. соответственно, и 30 мКраб во время мини-вспышек.

Во время первых двух самых ярких вспышек и двух мини-вспышек система перешла из низкого/жёсткого в высокое/мягкое состояние. Максимальный поток излучения (в диапазоне энергий 15–50 кэВ) во время мини-вспышек сравним с максимальным потоком во время сорванной вспышки 2016 г., однако во время последней система продемонстрировала только низкое/жёсткое состояние — вспышка сорвалась.

Различное поведением системы GRS1739-278 во время вспышек 1996, 2014 и 2016 гг. позволило нам провести исследование спектральных параметров источника при разных темпах аккреции. Сравнительный анализ показал, что па-

раметры аккреционного диска и степенной компоненты слабо зависят от потока в максимуме вспышки, хотя последний менялся на порядок величины от вспышки к вспышке.

Дальнейшие наблюдения системы GRS1739-278 могут пролить свет на природу мини-вспышек и сорванных вспышек.

ЛИТЕРАТУРА

- [Arnaud, 1996] *Arnaud K. A.* XSPEC: The First Ten Years. 1996. V. 101. P. 17.
- [Belloni, 2010] *Belloni T. M.* States and Transitions in Black Hole Binaries // Lecture Notes in Physics. Berlin: Springer Verlag, 2010. V. 794. P. 53–82.
- [Belloni, Motta, 2016] *Belloni T. M., Motta S. E.* Transient Black Hole Binaries // Astrophysics of Black Holes: From Fundamental Aspects to Latest Developments. 2016. V. 440. P. 61–97.
- [Borozdin, Trudolyubov, 2000] *Borozdin K. N., Trudolyubov S. P.* Detection of a 5 Hz Quasi-periodic Oscillation from X-Ray Nova GRS 1739-278 // *Astrophys. J.* 2000. V. 533. P. L131–L134.
- [Borozdin et al., 1998] *Borozdin K. N., Revnitsev M. G., Trudolyubov S. P., Aleksandrovich N. L., Sunyaev R. A., Skinner G. K.* The X-ray nova GRS 1739-278 near the Galactic center // *Astronomy Letters.* 1998. V. 24. P. 435–444.
- [Burrows et al., 2005] *Burrows D. N., Hill J. E., Nousek J. A., Kennea J. A., Wells A., Osborne J. P., Abbey A. F., Beardmore A., Mukerjee K., Short A. D. T.* et al. The Swift X-Ray Telescope // *Space Sci. Rev.* 2005. V. 120. P. 165–195.
- [Del Santo et al., 2016] *Del Santo M., Belloni T. M., Tomsick J. A., Sbarufatti B., Cadolle Bel M., Casella P., Castro-Tirado A., Corbel S., Grinberg V., Homan J.* et al. Spectral and timing evolution of the bright failed outburst of the transient black hole Swift J174510.8-262411 // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 456. P. 3585–3595.
- [Evans et al., 2007] *Evans P. A., Beardmore A. P., Page K. L., Tyler L. G., Osborne J. P., Goad M. R., O'Brien P. T., Vetere L., Racusin J., Morris D.* et al. An online repository of Swift/XRT light curves of γ -ray bursts // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 469. P. 379–385.
- [Fabian et al., 2015] *Fabian A. C., Lohfink A., Kara E., Parker M. L., Vasudevan R., Reynolds C. S.* Properties of AGN coronae in the NuSTAR era // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2015. V. 451. P. 4375–4383.
- [Ferrigno et al., 2012] *Ferrigno C., Bozzo E., Del Santo M., Capitanio F.* The first outburst of the black-hole candidate MAXI J1836-194 observed by INTEGRAL, Swift, and RXTE // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 537. P. L7.
- [Filippova et al., 2014] *Filippova E., Bozzo E., Ferrigno C.* INTEGRAL and Swift observations of the hard X-ray transient MAXI J1828-249 // *Astron. Astrophys.* 2014. V. 563. P. A124.
- [Krimm et al., 2014] *Krimm H. A., Barthelmy S. D., Baumgartner W., Cummings J., Gehrels N., Lien A. Y., Markwardt C. B., Palmer D., Sakamoto T., Stamatikos M., Ukwatta T.* Swift/BAT detects an outburst from the X-ray nova and black hole candidate GRS 1739-278 // *The Astronomer's Telegram.* 2014. V. 5986.
- [Mereminskiy et al., 2017] *Mereminskiy I. A., Filippova E. V., Krivonos R. A., Grebenev S. A., Burenin R. A., Sunyaev R. A.* The outburst of the X-ray nova GRS 1739-278 in September 2016 // *Astronomy Letters.* 2017. V. 43. P. 167–174.
- [Miller et al., 2015] *Miller J. M., Tomsick J. A., Bachetti M., Wilkins D., Boggs S. E., Christensen F. E., Craig W. W., Fabian A. C., Grefenstette B. W., Hailey C. J.* et al. New Constraints on the Black Hole Low/Hard State Inner Accretion Flow with NuSTAR // *Astrophys. J.* 2015. V. 799. P. L6.
- [Paul et al., 1996] *Paul J., Bouchet L., Churazov E., Sunyaev R.* GRS 1739-278 // *IAU Circ.* 1996. V. 6348.

- [Prosvetov, Grebenev, 2015] *Prosvetov A. V., Grebenev S. A.* QPO and LFN in the power spectrum of rapid variability for the X-ray nova SWIFT J174510.8-262411 // *Astronomy Letters*. 2015. V. 41. P. 549–561.
- [Remillard, McClintock, 2006] *Remillard R. A., McClintock J. E.* X-Ray Properties of Black-Hole Binaries // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2006. V. 44. P. 49–92.
- [Shakura, Sunyaev, 1973] *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. Astrophys.* 1973. V. 24. pp. 337–355.
- [Trudolyubov et al., 2001] *Trudolyubov S. P., Borozdin K. N., Priedhorsky W. C.* RXTE observations of 4U 1630-47 during the peak of its 1998 outburst // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2001. V. 322. P. 309–320.
- [Vikhlinin et al., 1994] *Vikhlinin A., Churazov E., Gilfanov M., Sunyaev R., Dyachkov A., Khavenson N., Kremnev R., Sukhanov K., Ballet J., Laurent P.* et al. Discovery of a low-frequency broad quasi-periodic oscillation peak in the power density spectrum of Cygnus X-1 with Granat/SIGMA // *Astrophys. J.* 1994. V. 424. P. 395–400.
- [Walter et al., 2010] *Walter R., Rohlfes R., Meharga M. T., Binko P., Morisset N., Beck M., Produit N., Pavan L., Savchenko V., Ferrigno C., Frankowski A., Bordas P.* Integral in Heavens // 8th Integral Workshop. The Restless Gamma-ray Universe (INTEGRAL 2010). 2010. P. 162.
- [Yan, Yu, 2017] *Yan Z., Yu W.* Detection of X-ray spectral state transitions in mini-outbursts of black hole transient GRS 1739-278 // ArXiv e-prints. 2017.

STUDYING OF BLACK HOLE CANDIDATE GRS1739-278 DURING ITS 2014 OUTBURST

Bykov S. D.^{1,2}, Filippova E. V.¹, Mereminskiy I. A.¹, Semena A. N.¹

¹ Space Research Institute RAS (IKI), Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

The properties of the X-ray nova GRS1739-278 during the 2014 outburst were investigated. According to SWIFT and INTEGRAL observatories data, it was showed that during the outburst, source underwent spectral state transition from low/hard state through intermediate hard and soft states to high/soft state. Based on standard spectral model, the estimates of the accretion disk parameters were obtained and their evolution was tracked. Hardness-Intensity and Hardness-Variability power diagrams was constructed, showing typical “q”-shaped pattern on the former and decreasing of variability with decreasing hardness on the latter diagram.

During intermediate hard and intermediate soft states quasi-periodic oscillations (QPO) at frequencies 0.4–5 Hz were found. Comparison between source parameters during all detected outbursts (in 1996, 2014, 2015 and 2016) was carried out.

Keywords: accretion, accretion disks, double stars, black holes

Bykov Sergey — laboratory assistant, komisar95@gmail.com

Filippova Ekaterina — researcher, PhD

Mereminskiy Ilya — engineer, PhD

Semena Andrey — researcher, PhD

СИСТЕМА ВИДЕОКОНТРОЛЯ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РАКЕТАХ-НОСИТЕЛЯХ

Д. И. Климов, Т. Т. Мамедов, Д. И. Косарев

АО «Российские космические системы»

Рассматривается система видеоконтроля для эксплуатации на ракетах-носителях. Основной целью создания такой является контроль наиболее важных процессов, сопровождающих движение ракет-носителей.

Приведены требуемые функциональные возможности системы, заключающиеся в видеосъёмке объекта, обработке видеоинформации и её передаче по каналу борт — Земля. Для оперативного решения вопроса реализации системы предлагается обработку и передачу целевой информации осуществлять на базе существующих алгоритмов сжатия, с использованием помехоустойчивого кодирования и формата передачи, рекомендованного CCSDS. Предложены принципы построения и основные технические характеристики системы как в автономном исполнении, так и в исполнении, предусматривающем интеграцию в имеющиеся системы телеметрии.

Для дальнейшего развития видеосистем в ракетно-космической технике предлагается разработать систему видеоконтроля для эксплуатации на космических аппаратах и разгонных блоках.

Ключевые слова: видеоконтроль, видеоинформация, алгоритм сжатия, помехоустойчивое кодирование

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время появление работ по созданию систем видеоконтроля (СВК) для ракет-носителей обусловлено недостаточностью существующих средств контроля для отслеживания штатного функционирования, а также оперативного и однозначного выявления причин возникновения нештатных и аварийных ситуаций, появляющихся в процессе полёта изделий ракетно-космической техники.

Рассматривается система видеоконтроля для эксплуатации на ракетах-носителях. Основной целью создания этой системы является контроль наиболее важных процессов, происходящих в пространстве, сопровождающих движение ракет-носителей, а именно:

- разделение составных частей ракеты;
- отделение полезной нагрузки;
- маневрирование.

Для видеосъёмки объекта и передачи видеопотока в требуемом формате по каналу борт — Земля система должна выполнять следующие функции:

- видеосъёмку объекта наблюдения;
- преобразование видеоизображения в электрический сигнал;

Климов Дмитрий Игоревич — инженер-исследователь второй категории, кандидат технических наук, mitguitar@yandex.ru

Мамедов Теймур Теймурович — начальник группы инженеров-исследователей, кандидат технических наук

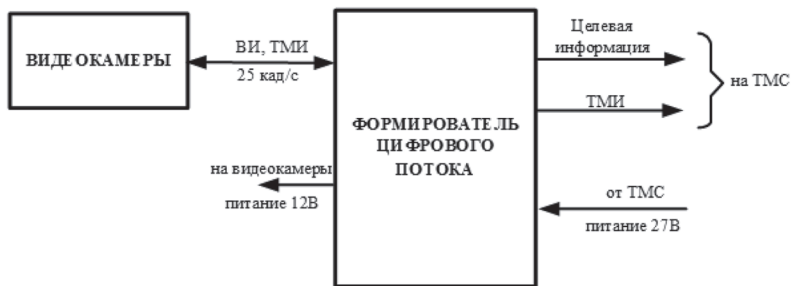
Косарев Дмитрий Игоревич — инженер-исследователь второй категории

- преобразование видеосигнала в цифровой поток;
- сжатие потока видеoinформации;
- передачу/приём видеопотока по Ethernet;
- временное хранение видеопотока;
- применение помехоустойчивого кодирования к потоку видеoinформации;
- сбор телеметрической информации о функциональном состоянии (работоспособности) составных частей системы;
- формирование транспортного кадра для передачи целевой информации;
- передачу транспортного кадра в соответствии с рекомендациями CCSDS;
- модуляцию целевой информации;
- усиление промодулированного информационного потока;
- перенос информационного потока в требуемый диапазон частот;
- передачу информации по высокочастотному тракту на антенно-фидерное устройство.

При этом система видеоконтроля должна быть создана в двух исполнениях:

- автономном;
- интегрированном в имеющиеся системы телеметрии.

а) система видеоконтроля в составе телеметрической системы



ВИ – видеoinформация

ТМИ – телеметрическая информация о состоянии приборов из состава АСВК

ТМС – телеметрическая система

б) автономная система видеоконтроля



Обобщённая функциональная схема системы видеоконтроля

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ВИДЕОКОНТРОЛЯ

С учётом вышесказанного, представим функциональную схему системы видеоконтроля, предназначенной для эксплуатации на ракетах-носителях.

От видеокамер оцифрованное и сжатое видеоизображение по Ethernet от видеокамер поступает на формирователь цифрового потока (ФЦП), где на видеоинформацию накладывается помехоустойчивое кодирование и формируется транспортный кадр в соответствии с рекомендациями CCSDS [CCSDS..., 2000]. Упакованная целевая информация поступает на передающее устройство, где осуществляется модуляция информационного потока, усиление промодулированного сигнала, перенос потока в требуемый частотный диапазон и передача его на антенно-фидерное устройство (АФУ).

Для оперативного решения вопроса реализации системы предлагается обработку и передачу целевой информации осуществлять на базе существующих алгоритмов сжатия с использованием помехоустойчивого кодирования и формата передачи, рекомендованного CCSDS. При эксплуатации системы видеоконтроля на ракетах-носителях не требуется радиационная защита её составных частей и длительный срок активного существования (САС), поэтому систему допускается комплектовать электрорадиоизделиями широкого потребления и нет необходимости в резервировании составных частей.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ВИДЕОКОНТРОЛЯ

Технические характеристики системы видеоконтроля, определяющие её функциональные возможности, задаются несколькими взаимозависимыми параметрами:

- 1) количество видеокамер — чем больше точек наблюдения обеспечивает система, тем более исчерпывающее описание наблюдаемого объекта можно получить. Динамика развития современных систем видеоконтроля для космической техники (разработки Ecliptic Enterprises Corporation, США [RocketCam..., 2002]) показывает неизменный рост количества видеокамер;
- 2) качество видеоинформации — в наиболее общем случае определяется разрешением видеокамер и используемыми алгоритмами сжатия. Увеличение разрешения ведёт к улучшению качества видеоинформации, а увеличение степени сжатия к его ухудшению;
- 3) информативность системы — параметр, ограничивающий возможности системы в плане качества и количества видеоинформации. С одной стороны, информативность должна быть достаточной для выполнения требований по количеству и качеству видеоинформации, с другой — должна быть минимизирована.

Современные видеокамеры обладают возможностью гибкой настройки разрешения и алгоритмов сжатия. Количество видеокамер определяется пропускной способностью канала.

Широкий спектр возможных разрешений позволяет выбирать нужное при требованиях к ограничению пропускной способности канала,

полосе частот, частотному диапазону и качеству видеоизображения относительно разрешающей способности и динамике процесса, за которым ведётся видеонаблюдение;

- 4) форматы сжатия H.264 (High/Main/Baseline profile) и JPEG.

При использовании формата H.264 предполагается динамическое сжатие видеоизображения с коэффициентом сжатия до 200 при наличии опорного кадра с заданной частотой. При использовании формата JPEG — пок кадровое сжатие с коэффициентом до 50 [Ozer, 2009]. Однако формат H.264 предусматривает гораздо более сложную техническую реализацию (преобразование Адамара и целочисленное дискретное косинус-преобразование), нежели JPEG (дискретное косинус-преобразование), а также в случае потери опорного кадра полностью теряется и часть видеoinформации, относящаяся к нему;

- 5) настройки коэффициента сжатия по заданию информативности выходного потока в диапазоне от 64 кбит/с до 32 Мбит/с.

Настройки коэффициента сжатия позволяют использовать беспроводные каналы разной пропускной способности в зависимости от дальности расстояния приёмной и передающей станций и от решаемых задач;

- 6) сетевой порт Ethernet 10BASE-T/100BASE-TX [Metcalfe, 1976] для передачи видеоданных потребителю и внешнего управления видеокамерами.

Основными преимуществами Ethernet являются [Олифер, 2010]:

- а) высокая скорость передачи данных,
- б) высокая стабильность передачи информации,
- в) широкое применение в системах передачи данных,
- г) простота реализации;

- 7) видеокамеры обеспечивают возможность гибкой настройки параметров съёмки в процессе функционирования.

Данная возможность позволяет эффективно использовать выделяемую полосу частот для передачи видеoinформации с надлежащим качеством и достоверностью, а именно способностью:

- а) приближения/удаления от объекта наблюдения при фиксированной установке видеокамер,
- б) увеличения коэффициента сжатия при слабой динамике процесса, подвергающимся видеоконтролю;
- в) регулировки диаметра зрачка (светосилы) объектива видеокамеры при разном уровне освещения.

Для видеонаблюдения объектов при отделении ступеней необходимо использовать системы, посредством которых возможен контроль механических повреждений конструкции.

Потребляемая мощность СВК не более 100 Вт, при этом:

- потребляемая мощность одной ВК не более 10 Вт;
- потребляемая мощность ФЦП не более 15 Вт;
- потребляемая мощность передающего устройства не более 45 Вт.

Способ формирования телеметрического кадра — пакетная телеметрия стандарта CCSDS [CCSDS..., 2000].

Основные технические характеристики системы видеоконтроля представлены ниже.

Скорость передачи видеоизображения	до 25 Гц
Разрешение	720×576 пикс
Алгоритм сжатия видеоинформации	H.264
Коэффициент сжатия видеоинформации	от 100 до 200
Пропускная способность радиоканала передачи видеоданных, не более . .	10 Мбит/с
Потребляемая мощность, не более	100 Вт
Напряжение питания борт сети	27 В
Рабочий диапазон температуры	−40...+50 °С
Масса, не более	10 кг

Для дальнейшего развития видеосистем в ракетно-космической технике предлагается разработать систему видеоконтроля для эксплуатации на космических аппаратах и разгонных блоках, подразумевающую за собой резервирование функциональных блоков (дублирование), введение термо- и радиационной защиты [Климов, 2016].

ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

- сформулирована актуальность применения систем видеоконтроля на ракетах-носителях;
- определён облик и принципы построения системы видеоконтроля;
- приведены основные технические характеристики системы.

ЛИТЕРАТУРА

- [Климов, 2016] *Климов Д. И., Благодарёв В. А.* Термовидеосистема для установки на космические аппараты и ракеты-носители // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3. Вып. 3. С. 76–83.
- [Олифер, 2010] *Олифер В. Г., Олифер Н. А.* Коммутируемые сети Ethernet. Гл. 13 // Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер. 2010. С. 402–447.
- [CCSDS..., 2000] Consultative Committee for Space Data Systems: Recommendation for Packet Telemetry. Packet Telemetry. CCSDS 102.0-B-5. Blue Book. 102.0-B-5. 2000. Iss. 5. 45 p.
- [Metcalfe, 1976] *Metcalfe R. M., Boggs D. R.* Ethernet: distributed packed switching for local computer networks // ACM Communications. 1976. V. 19. Iss. 5. P. 395–404.
- [Ozer, 2009] *Ozer J.* H.264 Royalties: what you need to know / Streaming Learning Center. 2009. URL: <https://streaminglearningcenter.com/articles/h-264-royalties-what-you-need-to-know.html>.
- [RocketCam..., 2002] RocketCam: Digital Video System (DVS) / Ecliptic Enterprises Corporation, 2002, 4 p.

VIDEO MONITORING SYSTEM FOR USE ON LAUNCH VEHICLES

Д. И. Климов, Т. Т. Мамедов, Д. И. Косарев

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

Seen a video monitoring system for use in launch vehicles. The main purpose of creating a video surveillance system for launch vehicles is to control the most important processes that accompany the movement of launch vehicles.

The required functionality of the system consists in video shooting of the object, processing of video information and its transmission over the communication channel. In order to solve the problem of system implementation, it is proposed to process and transmit target information on the basis of existing compression algorithms using error-correction encoding and transmission format recommended by CCSDS. The principles of construction and the main technical characteristics of the system as an autonomous version, and in execution, providing for integration into existing telemetry systems.

For the further development of video systems in rocket and space technology, it is proposed to develop a video control system for operation on spacecraft and upper stages.

Keywords: video monitoring, video information, compression, error-correction coding

Klimov Dmitry Igorevich — research engineer second category, PhD, mitguitar@yandex.ru

Mamedov Teymur Tejmurovich — leader of group of reseach engineers, PhD

Kosarev Dmitry Igorevitsj — research engineer second category

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЛУНЫ НА СОСТАВ МАНТИИ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ

Е. В. Кронрод¹, К. Matsumoto², О. Л. Кусков¹, В. А. Кронрод¹

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского
Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

² Национальная астрономическая обсерватория Японии

С помощью метода инверсии Байеса и алгоритма МСМС (метод Монте-Карло по схеме марковских цепей) проведено исследование влияния температуры в мантии Луны на химический состав (концентрации основных оксидов Al_2O_3 , FeO , MgO) и сейсмические скорости в мантии, а также оценка возможных величин размеров ядра. Определение температуры и концентрации основных оксидов осуществлялось с помощью термодинамических методов моделирования фазовых отношений и физических свойств в пятикомпонентной минеральной $\text{CaO-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с использованием метода минимизации свободной энергии Гиббса [Kuskov, Kronrod, 2009]. Для процедуры инверсии использован набор геофизических данных (геодезические: средний радиус (R), масса (M), нормализованный момент инерции (I_s/MR^2), число Лява второго порядка (k_2) и сейсмические: данные о временах прихода сейсмических волн). Луна принимается вязкоупругой сферически-симметричной и состоит из девяти слоёв с постоянными физическими свойствами в каждом слое: мегареолит, кора, четыре слоя мантии, слой пониженной вязкости, жидкое внешнее ядро и твёрдое внутреннее ядро. Физические свойства в каждой зоне приняты постоянными. Деление мантии на слои проводилось в соответствии с сейсмической моделью. Концентрации основных оксидов задавались равными в трёх верхних слоях мантии, для расчёта концентраций в нижней мантии применялась модель магматического океана.

Рассмотрены два типа геохимических моделей валового состава Луны: 1 — модели, по валовому содержанию Al_2O_3 близкие к силикатной Земле, 2 — модели с валовым содержанием Al_2O_3 , превышающим земные значения ($>4,5$ мас.%). Температурные профили в мантии Луны рассматривались линейными, температура задавалась в серединах мантийных слоёв на глубинах 150, 375, 625 и 1000 км. На глубине 150 км температура задавалась 600 °С, в нижней мантии варьировалась от 1000 до 1400 °С.

Показано, что для обоих вариантов моделей при широком диапазоне температуры в нижней мантии возможно получить мантийные распределения концентрации основных оксидов, согласующиеся с заданным валовым составом Al_2O_3 , FeO . Найденные величины концентрации и скорости в мантии хорошо согласуются с известными результатами, полученными другими авторами.

Ключевые слова: Луна, численное моделирование, инверсия, внутреннее строение, сейсмика, термодинамика

Кронрод Екатерина Викторовна — младший научный сотрудник, e.kronrod@gmail.com

Matsumoto Koji — professor

Кусков Олег Львович — главный научный сотрудник, доктор химических наук, член-корреспондент РАН

Кронрод Виктор Александрович — ведущий научный сотрудник, доктор химических наук

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Основная цель данного исследования — согласование геофизической и геохимической информации с применением термодинамического подхода и построение согласованной по составу и строению модели Луны. Решение обратной задачи осуществляется с использованием термодинамического моделирования фазовых отношений и физических свойств в пятикомпонентной минеральной $\text{CaO-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Используется метод минимизации свободной энергии Гиббса и согласованная база данных, содержащая уравнения состояния минералов и твёрдых растворов. Расчёт фазовых диаграмм для заданного состава осуществлялся с помощью программного комплекса THERMOSISM [Kuskov et al., 2014].

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВАЛОВОГО СОСТАВА ЛУНЫ

Современные геохимические модели валового состава Луны по концентрациям FeO и Al_2O_3 показаны на рис. 1. Большинство моделей достаточно схожи по концентрациям оксида железа FeO , однако содержание тугоплавких оксидов (Al_2O_3 , CaO) может быть весьма различным.

Все представленные на рис. 1 модели можно разделить на две группы: 1 — модели с близким к земному содержанием оксида алюминия, 2 — модели с валовым содержанием алюминия, значительно превышающим значение для Земли. Анализ моделей современного состава Луны показал следующие диапазоны возможных концентраций основных оксидов для обоих типов моделей: для первого типа: $3,5 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 4,5$ ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,05 \pm 0,35$ мас.%) и для второго типа: $4,5 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 7,7$ ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,91 \pm 0,39$ мас.%). Оба типа моделей по оксиду железа характеризуются значениями $10 \leq \text{FeO} \leq 14$ ($\text{FeO} = 12,25 \pm 1,33$ мас.%).

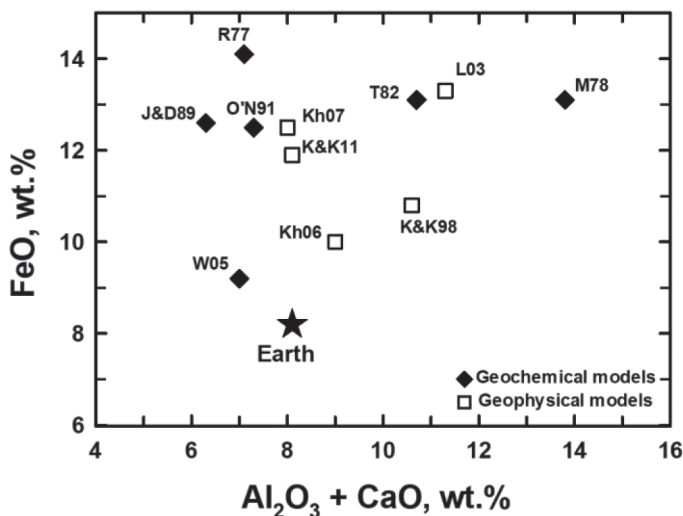


Рис. 1 Геофизические и геохимические модели валового состава Луны (кора + мантия) и силикатной Земли [Kuskov et al., 2014]

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Для инверсии применяются геофизические данные [Matsumoto et al., 2015] (см. ниже): четыре геодезических — средний радиус (R), масса (M), нормализованный момент инерции (I_s/MR^2), число Лява второго порядка (k_2) по результатам анализа геодезических данных [Williams et al., 2014]).

Средний радиус (R)	1737,151 км
Масса (M)	$(7,34630 \pm 0,00088) \cdot 10^{22}$ кг
Нормализованный момент инерции (I_s)	$0,393112 \pm 0,000012$
Число Лява (k_2)	$0,02422 \pm 0,00022$
Добротность с периодом месяц (Q_m)	38 ± 4
Добротность с периодом год (Q_a)	41 ± 9

Использовались данные миссии «Аполлон» о времени пробега сейсмических волн (travel times) [Lognonné et al., 2003]: всего 318 (183 для Р-волн и 135 для S-волн) от 59 источников (24 глубокофокусных события, 8 приповерхностных лунотрясений, 19 метеороидных импактов, 8 искусственных).

Ошибка в определении n -го времени прихода (σ_{tn}) записывается следующим образом:

$$\sigma_{tn} = \sqrt{\sigma_{n,r}^2 + \sigma_{n,e}^2}, \quad (1)$$

где $\sigma_{n,r}$ и $\sigma_{n,e}$ — ошибки в считывании события и в определении времени прихода волн соответственно. В рассматриваемой модели ошибка σ_{tn} принимается увеличенной втрое по отношению к принятым в работе [Lognonné et al., 2003], что позволило получить согласованные с геохимическими ограничениями решения.

МОДЕЛЬ ЛУНЫ

Принимается вязкоупругая сферически симметричная модель Луны, состоящей из девяти слоёв: мегареолит, кора, четыре слоя мантии, слой пониженной вязкости (LVZ — low viscosity zone), внешнее жидкое ядро и твёрдое внутреннее ядро. Деление мантии на слои от границы кора — мантия до зоны LVZ произведено в соответствии с моделью [Gagnepain-Beuieux et al., 2006]: первый слой (Mantle 1) — 34...250 км, второй (Mantle 2) — 250...500 км, третий (Mantle 3) — 500...750 км, четвёртый (Mantle 4) — 750...~1250 км (до границы с LVZ, мощность которой определяется в результате решения обратной задачи). В каждой зоне физические свойства и концентрации считаются постоянными. При решении обратной задачи накладываются условия неубывания с глубиной плотности в мантии.

Мощность коры задаётся 34 км [Wieczorek et al., 2013] (включая 1 км-слой мегареолита). Состав коры принимается по работе [Taylor, 1982]. В мантии концентрация Al_2O_3 и CaO связана хондритовым отношением $CaO/Al_2O_3 = 0,8$ [Ringwood, Essene, 1970].

Концентрации основных оксидов считаются равными в трёх верхних слоях мантии (слои Mantle 1 — Mantle 3), а при расчёте концентрации в нижней

мантии (слой Mantle 4) применялась гипотеза магматического океана [Shearer et al., 2006; Elkins-Tanton et al., 2011; Khan et al., 2013], в соответствии с которой концентрация основных оксидов в нижней мантии равна средней концентрации в вышележащих слоях (верхняя мантия + кора) и равна валовой концентрации в силикатной Луне [Kronrod, Kuskov, 2011].

ПРОФИЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ В МАНТИИ ЛУНЫ

В работе исследовался широкий диапазон возможных температур в мантии. Рассматривались линейные температурные профили с температурой в нижней мантии от 950 до 1400 °С с шагом 50 °С (отдельно показаны профили температуры 1350 и 1400 °С, рис 2). В верхней мантии принято среднее значение (600 °С) из возможного диапазона температуры (500–700 °С) [Кронрод, Кусков, 2016]. Показано, что вариации температуры в верхней мантии ± 50 °С слабо влияют на конечное решение.

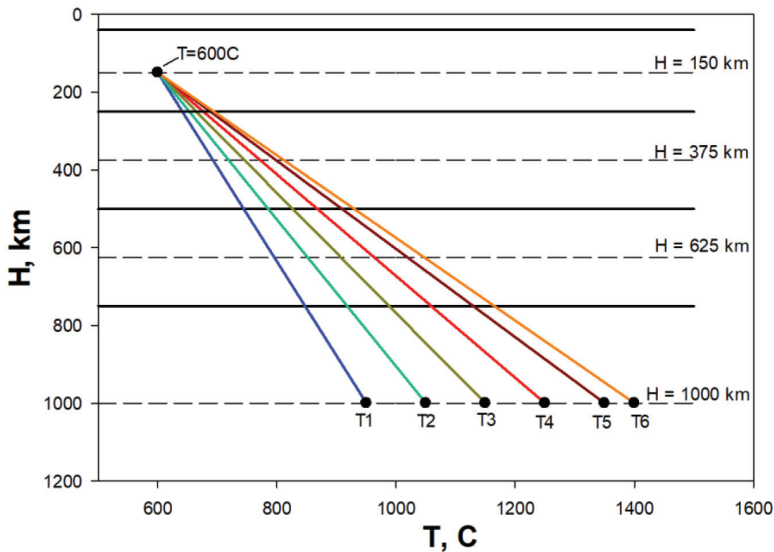


Рис. 2. Распределения температуры в мантии Луны

ИНВЕРСИЯ

В данной работе для определения параметров внутреннего строения Луны использовался метод Байеса — эффективный метод решения обратных нелинейных задач, таких как моделирование внутреннего строения планетных тел [Khan et al., 2007]. Применяется алгоритм Монте-Карло по схеме марковских цепей (метод МСМС). Решение для искомым параметров определяется из их апостериорного распределения. Затем рассчитывается функция правдоподобия LHF, которая показывает меру отклонения модельных расчётных значений от наблюдаемых.

$$LHF = \exp \left(\frac{\left(d_{obs}^{mass} - d_{cal}^{mass}(m) \right)^2}{2\sigma_{mass}^2} + \frac{\left(d_{obs}^{MOI} - d_{cal}^{MOI}(m) \right)^2}{2\sigma_{MOI}^2} + \frac{\left(d_{obs}^{k_2} - d_{cal}^{k_2}(m) \right)^2}{2\sigma_{k_2}^2} - \frac{\left(d_{obs}^{Qa} - d_{cal}^{Qa}(m) \right)^2}{2\sigma_{Qa}^2} - \frac{\left(d_{obs}^{Qm} - d_{cal}^{Qm}(m) \right)^2}{\sigma_{Qm}^2} - \sum_{n=1}^{318} \frac{\left(d_{obs}^{\tau n} - d_{cal}^{\tau n}(m) \right)^2}{\sigma_{\tau n}^2} - \frac{\left(d_{obs}^{Al\ bulk} - d_{cal}^{Al\ bulk}(m) \right)^2}{\sigma_{Al\ bulk}^2} - \frac{\left(d_{obs}^{Fe\ bulk} - d_{cal}^{Fe\ bulk}(m) \right)^2}{\sigma_{Fe\ bulk}^2} \right), \quad (2)$$

где d_{obs} , $d_{cal}(m)$, σ , τn — наблюдаемые данные, рассчитанные по модели m данные и погрешность в наблюдаемых данных и n -го времени прихода сейсмических волн, соответственно (аналогично [Matsumoto et al., 2015]). Для согласования геофизических и геохимических данных в LHF включены валовые концентрации оксидов алюминия и железа (Al_{bulk} и Fe_{bulk}). Для первого типа моделей $Al_{bulk} = (Al_2O_3)_{bulk} = 4,05 \pm 0,35$ мас.%, для второго типа: $Al_{bulk} = (Al_2O_3)_{bulk} = 5,91 \pm 0,39$ мас.%. Валовое значение $Fe_{bulk} = (FeO)_{bulk} = 12,25 \pm 1,33$ мас.% принято одинаковым для обеих моделей.

Моделирование состава и физических свойств мантии Луны проводилось в интервале концентрации оксидов, охватывающем набор потенциально возможных лунных составов [Taylor, 1982; Shearer et al., 2006; Longhi, 2006; Kronrod, Kuskov, 2011 и др.] мас.%.: $25 \leq MgO \leq 45$ %, $40 \leq SiO_2 \leq 55$ %, $5 \leq FeO \leq 15$ %, $0,1 \leq CaO, Al_2O_3 \leq 7$ %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате инверсии геофизических и геохимических данных для каждого температурного профиля (см. рис. 2) были получены концентрации основных оксидов в мантии, сейсмические скорости в каждом слое, размеры внешнего жидкого и твёрдого внутреннего ядра, а также сейсмическая скорость и плотность в LVZ (рис. 3). Для удобства изображения на рисунках показаны результаты с шагом по температуре в нижней мантии в 100 °C.

Результаты расчётов представлены на рис. 3 для первого типа моделей (с близким к Земле валовым содержанием Al_2O_3) и на рис. 4 для второго типа моделей (с валовым Al_2O_3 , превышающим значения для Земли). Общий тренд роста/убывания каждого из параметров сохраняется до температуры 1250 °C. При дальнейшем увеличении температуры решение перестаёт следовать наблюдаемой зависимости.

При температуре в нижней мантии 1400 °C возникает очевидное разделение решения по всем параметрам для обоих типов моделей (приведено только для концентрации основных оксидов на рис. 1а–в), причём величина расчётных параметров для этих решений оказывается нереалистичной по геохимическим и геофизическим ограничениям. При температуре ~ 1300 °C для первого типа моделей получены аномальные значения скорости V_p в нижней мантии. Для второго типа моделей при температуре 1300 °C для концентрации Al_2O_3

в решении проявляется два пика на гистограммах. Можно полагать, что в предлагаемой постановке модели Луны верхний предел температуры в нижней мантии составляет 1250 °С.

Распределения сейсмических скоростей и плотности практически совпадают для обоих типов моделей и хорошо согласуются со скоростями по модели [Gagnepain-Beuneix et al., 2006] в верхней мантии (слои Mantle 1 и Mantle 2), в слое Mantle 3 полученные значения V_p выше, а в слое Mantle 4 ниже, чем наиболее вероятные скорости по модели [Gagnepain-Beuneix et al., 2006], однако укладываются в погрешности данной модели.

Для всех рассмотренных температурных профилей при температуре меньше 1400 °С наблюдаются слабые вариации по концентрациям основных оксидов в мантии. Содержание оксида алюминия (см. рис. 3а) в нижней мантии (равное его валовой концентрации) составляет от 3 до 5 мас. % (наиболее вероятное значение для всех температурных профилей около 4,1, что близко к наблюдаемому значению 4,05).

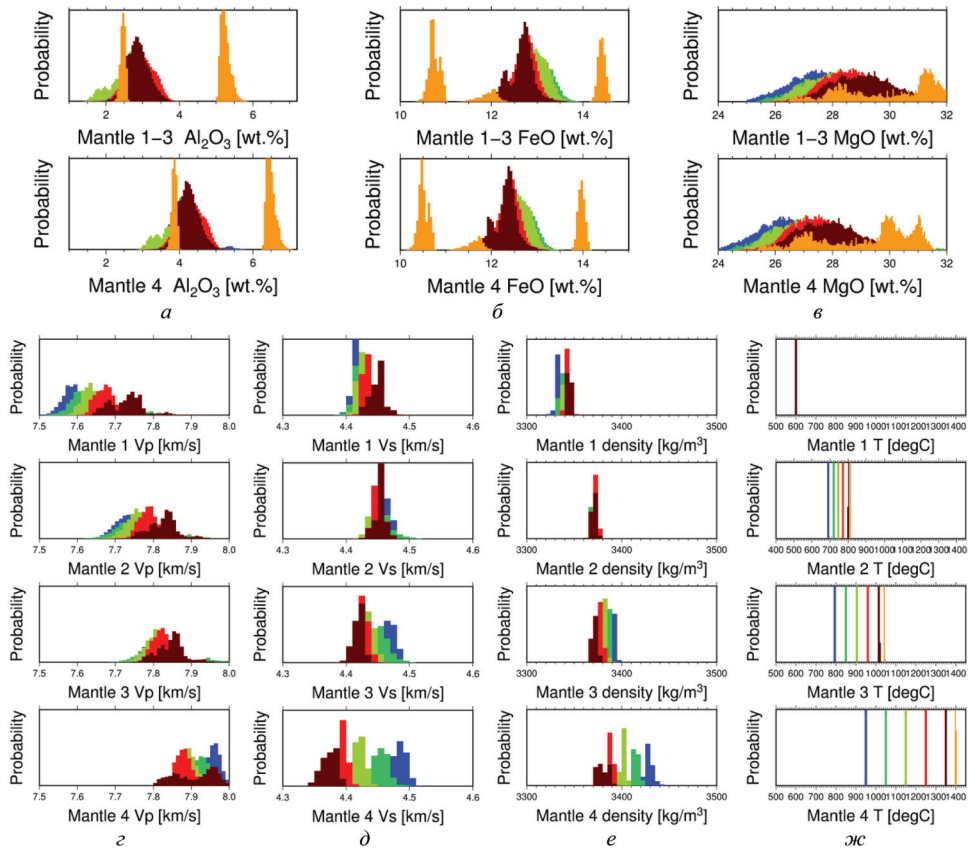


Рис. 3. Вероятное распределение параметров для мантийных слоёв 1–4 в мантии Луны в случае моделей первого типа (валовая концентрация алюминия близка к земному значению): *a* — концентрация Al_2O_3 ; *б* — концентрация FeO; *в* — концентрация MgO; *г* — скорость P-волн; *д* — скорость S-волн; *е* — плотность в зависимости от температуры в нижней мантии (*ж*)

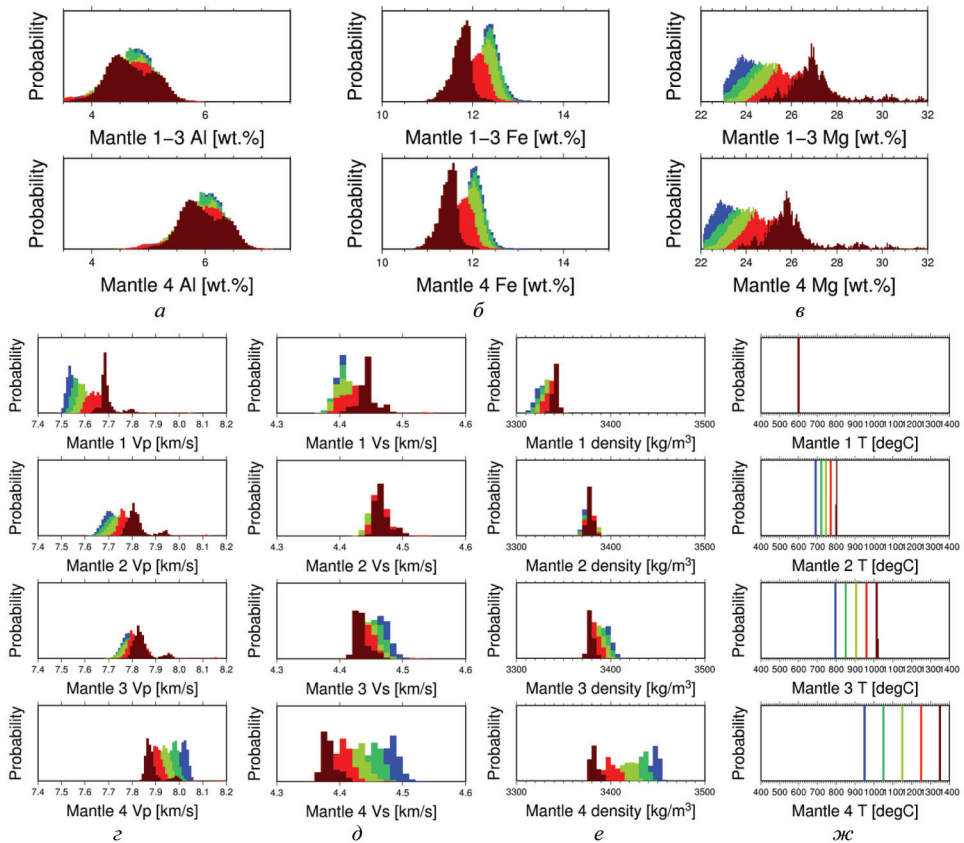


Рис. 4. Вероятное распределение параметров в мантии Луны для моделей второго типа (валовая концентрация алюминия превышает земное значение): *a* — концентрация Al_2O_3 ; *б* — концентрация FeO; *в* — концентрация MgO; *г* — скорость P-волн; *д* — скорость S-волн; *е* — плотность в зависимости от температуры в нижней мантии (*ж*)

В верхней мантии (Mantle 1 – Mantle 3) содержание Al_2O_3 для большинства моделей от 2 до 4 мас.%, наиболее вероятное — от 2,5 для самого низкотемпературного профиля до 3,5 для высокотемпературного. Концентрация оксида железа (FeO) составляет 12,5–13,5 мас.% в верхней мантии, и практически столько же в нижней мантии (12–13 мас.%, с наиболее вероятным значением 12,5) и практически не зависит от распределения температуры (см. рис. 3б). В верхней мантии наблюдается незначительное уменьшение концентрации FeO с увеличением температуры. Концентрация MgO (см. рис. 3в) возрастает с возрастанием температуры и составляет 26–30 мас.% в верхней мантии и 24–30 мас.% в нижней. В целом полученные значения концентрации согласуются с результатами, полученными в работах [Khan et al., 2007; Kronrod, Kuskov, 2011].

Сейсмические скорости P-волн постепенно возрастают с увеличением глубины от 7,55–7,70 км/с в верхней мантии до 7,85–8 км/с в нижней мантии. Скорости P-волн в верхней мантии заметно увеличиваются с возрастанием температуры от 7,55–7,65 для самой низкотемпературной модели до 7,65–7,70

для профиля с температурой в нижней мантии 1250 °С. В слое Mantle 2 рост скоростей с увеличением температуры становится менее заметным, в слое 3 скорости Р-волн практически одинаковы для всех температурных профилей (7,70–7,90 км/с с наиболее вероятным значением 7,81–7,82 км/с). В нижней мантии (Mantle 4) наблюдается обратная зависимость между скоростью и температурой в мантии — понижение скорости с ростом температуры от 8,0 до 7,85 км/с. На графиках для S-волн также присутствует обратная зависимость скорости от температуры, однако она возникает уже на меньшей глубине и составляет 4,4–4,5 км/с в нижнем слое Mantle 3, в слое Mantle 2 скорость S-волн не изменяется при изменении температуры (4,42–4,44 км/с). В верхней мантии скорость слабо возрастает с ростом температуры от 4,41 до 4,43 км/с. Скорость S-волн слабо возрастает при переходе от верхнего слоя Mantle 1 к слою Mantle 2 и далее уменьшается.

Аналогичная зависимость от температуры (см. рис. 3e) наблюдается для плотности, за исключением Mantle 1, где плотность незначительно уменьшается при увеличении от температуры.

Для второй группы моделей (с концентрацией Al_2O_3 выше земного) изменение параметров с глубиной, а также влияние распределения температуры на параметры аналогично первому типу, однако сами значения несколько отличаются. Концентрация Al_2O_3 составляет 4,5–5 мас.% для верхней мантии и 5,5–6,5 мас.% для нижней. Концентрация FeO составляет 12–13 мас.% в верхней мантии и 11,5–12,5 мас.% в нижней.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние распределений температуры в мантии Луны на скорости и концентрации основных оксидов (Al_2O_3 , FeO, MgO) в мантии для моделей, близких к земным по валовому составу Al_2O_3 , и моделей, обогащённых оксидом алюминия по сравнению с Землёй.

2. Показано, что для обоих типов моделей в широком линейном диапазоне температуры от 600 °С в верхней мантии до 950–1250 °С в нижней, при условии увеличения в три раза ошибки в “travel times”, возможно получить решения, согласованные с геохимическими и геофизическими ограничениями. Найденные мантийные распределения концентраций и скоростей хорошо согласуются с известными результатами, полученными другими авторами.

3. Для заданного закона распределения мантийной температуры установлена предельная температура в нижней мантии (1250 °С).

ЛИТЕРАТУРА

[Кронрод, Кусков, 2016] Кронрод Е. В., Кусков О. Л. Холодные» и «горячие» модели мантии Луны // 17-я Международная конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 26–28 сент. 2016, Борок, 30 сент. 2016: Материалы конф. 2016. С. 153–156.

- [Elkins-Tanton et al., 2011] *Elkins-Tanton L. T., Burgess S., Yin Q.-Z.* The lunar magma ocean: Reconciling the solidification process with lunar petrology and geochronology // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 304. P. 326–336.
- [Gagnepain-Beyneix et al., 2006] *Gagnepain-Beyneix J., Lognonné P., Chenet H., Lombardi D., Spohn T.* A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2006. V. 159. P. 140–166. DOI: 10.1016/j.pepi.2006.05.009.
- [Khan et al., 2007] *Khan A., Connolly J. A. D., MacLennan J., Mosegaard K.* Joint inversion of seismic and gravity data for lunar composition and thermal state // *Geophysical J. International.* 2007. V. 168. P. 243–258.
- [Khan et al., 2013] *Khan A., Pommier A., Neumann G., Mosegaard K.* The lunar moho and the internal structure of the Moon: A geophysical perspective // *Tectonophysics.* 2013. V. 609. P. 331–352.
- [Kronrod, Kuskov, 2011] *Kronrod V. A., Kuskov O. L.* Inversion of seismic and gravity data for the composition and core size of the Moon // *Izv. Phys. Solid Earth.* 2011. V. 47. P. 711–730. DOI: 10.1134/S1069351311070044.
- [Kuskov, Kronrod, 2009] *Kuskov O. L., Kronrod V. A.* Geochemical constraints on the model of the composition and thermal conditions of the Moon according to seismic data // *Izv. Phys. Solid Earth.* 2009. V. 45. P. 753–768. DOI: 10.1134/S1069351309090043.
- [Kuskov et al., 2014] *Kuskov O. L., Kronrod V. A., Kronrod E. V.* Thermo-chemical constraints on the interior structure and composition of the lunar mantle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2014. V. 235. P. 84–95. doi: 10.1016/j.pepi.2014.07.011
- [Longhi, 2006] *Longhi J.* Petrogenesis of picritic mare magmas: constraints on the extent of early lunar differentiation // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2006. V. 70. P. 5919–5934.
- [Lognonné et al., 2003] *Lognonné P., Gagnepain-Beyneix J., Chenet H.* A new seismic model of the Moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon // *Earth and Planetary Science Letters.* 2003. V. 211. Iss. 1–2. P. 27–44.
- [Matsumoto et al., 2015] *Matsumoto K., Yamada R., Kikuchi F., Kamata S., Ishihara Y., Iwata T., Hanada H., Sasaki S.* Internal structure of the Moon inferred from Apollo seismic data and selenodetic data from GRAIL and LLR // *Geophysical Research Letters.* 2015. V. 42. Iss. 18. P. 7351–7358. DOI: 10.1002/2015GL065335.
- [Ringwood, Essene, 1970] *Ringwood A. E., Essene E.* Petrogenesis of Apollo 11 basalts, internal constitution and origin of the moon // *Proc. Apollo 11 Lunar Science Conf.* 1970. V. 1. P. 769–799.
- [Shearer et al., 2006] *Shearer C. K., Hess P. C., Wieczorek M. A., Pritchard M. E., Parmentier E. M., Borg L. E., Longhi J., Elkins-Tanton L. T., Neal C. R., Antonenko I., Canup R. M., Halliday A. N., Grove T. L., Hager B. H., Lee D. C., Wiechert U.* Thermal and magmatic evolution of the Moon // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry.* 2006. V. 60. P. 365–518.
- [Taylor, 1982] *Taylor S. R.* *Planetary Science: A Lunar Perspective.* Houston: LPI, 1982. 481 p.
- [Wieczorek et al., 2013] *Wieczorek M. A., Neumann G. A., Nimmo F.* et al. The crust of the moon as seen by GRAIL // *Science.* 2013. V. 339(6120). P. 671–675.
- [Williams et al., 2014] *Williams J. G., Konopliv A. S., Boggs D. H., Park R. S., Yuan D.-N., Lemoine F. G., Goossen S., Mazarico E., Nimmo F., Weber R. C., Asmar S. W., Melosh H. J., Neumann G. A., Phillips R. J., Smith D. E., Solomon S. C., Watkins M. M., Wieczorek M. A., Andrews-Hanna J. C., Head J. W., Kiefer W. S., Matsuyama I., McGovern P. J., Taylor G. J., Zuber M. T.* Lunar interior properties from the GRAIL mission // *J. Geophysical Research-Planets.* 2014. P. 119. P. 1546–1578.

THE EFFECT OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE MOON ON THE COMPOSITION AND SEISMIC VELOCITIES IN THE LUNAR MANTLE

E. Kronrod¹, K. Matsumoto², O. Kuskov¹, V. Kronrod¹

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI RAS)

² National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), RISE Project Office

The effect of the temperature in the mantle of the Moon on the chemical composition (concentrations of the main oxides Al_2O_3 , FeO, MgO) and seismic velocities in the mantle were studied using the Bayes inversion method and the MCMC algorithm (the Monte Carlo method using the Markov chain scheme).

The temperature and concentrations of the main oxides were calculated using thermodynamic methods for modeling phase relations and physical properties in five-component mineral system CaO-FeO-MgO- Al_2O_3 - SiO_2 using the Gibbs free energy minimization method [Kuskov, Kronrod, 2009].

For the inversion, a set of geophysical data was used (selenodetic: mean radius (R), mass (M), normalized moment of inertia (I_s/MR^2), Love number (k_2), and seismic: travel time data. The Moon is assumed to be viscoelastic spherically symmetric and consists of nine layers with constant physical properties in each layer: megaregolite, core, four layers of mantle, low viscosity zone (LVZ), a liquid outer core and a solid inner core. The physical properties in each zone are assumed to be constant.

The division of the mantle into layers was carried out in accordance with the seismic model. The concentrations of the main oxides were set equal in the three upper layers of the mantle, and a model of the magma ocean was used to calculate the concentrations in the lower mantle.

Two types of geochemical models of the bulk composition of the Moon are considered: 1 — models based on the Al_2O_3 bulk content close to the silicate Earth, 2 — models with a bulk Al_2O_3 content exceeding terrestrial values (>4.5 wt.%). There were considered linear temperature profiles in the mantle of the Moon, the temperature was set in the middle of the mantle layers at depths of 150, 375, 625 and 1000 km. At a depth of 150 km the temperature was set at 600 °C, in the lower mantle it varied from 1000 to 1400 °C.

It is shown that for both variants of models with a wide range of temperatures in the lower mantle it is possible to obtain mantle distributions of the concentrations of the main oxides, consistent with the specified bulk composition of Al_2O_3 , FeO. The values of concentrations and velocities in the mantle found agree well with known results obtained by other authors.

Keywords: Moon, numerical modeling, inversion, internal structure, seismic, thermodynamic properties

Kronrod Ekaterina — junior researcher, e.kronrod@gmail.com

Matsumoto Koji — professor

Kuskov Oleg — chief researcher

Kronrod Victor — lead researcher

МОНИТОРИНГ НЕТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЁЗДНОГО СКОПЛЕНИЯ АРКИ В ЦЕНТРЕ ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИЙ NUSTAR И ХММ-NEWTON

Е. А. Кузнецова, Р. А. Кривonos

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Молекулярные облака, расположенные в центре Галактики, являются уникальным источником информации о прошлой активности сверхмассивной чёрной дыры Стрелец А*. Сильные вариации рентгеновского излучения молекулярных облаков поддерживают гипотезу флуоресценции газа от прошлой вспышечной активности Стрельца А*. Недавние наблюдения обсерваториями NuSTAR и ХММ-Newton молекулярного облака вокруг звёздного скопления Арки демонстрируют резкие изменения как в морфологии, так и в интенсивности нетеплового излучения, аналогичные наблюдаемым в Центральной молекулярной зоне (ЦМЗ) Галактического центра (ГЦ). Мы продолжаем программу мониторинга звёздного скопления Арки обсерваторией NuSTAR, для исследования переменности нетеплового излучения вокруг скопления. В статье представлены результаты наблюдений 2015–2016 гг.

Ключевые слова: нетепловое излучение, молекулярное облако, звёздное скопление, Галактический центр, рентгеновское излучение

ВВЕДЕНИЕ

Скопление Арки — интересный и необычный объект нашей Галактики [Coteget al., 1996; Serabyn et al., 1998]. Оно представляет собой чрезвычайно массивное и плотное скопление из молодых звёзд, расположенное в области Галактического центра Стрелец А* и удалённое от него на проекционное расстояние 11'. Скопление содержит более 160 звёзд О-типа с начальными массами, большими 20 масс Солнца (M_{Solar}). Средняя плотность скопления составляет $\sim 3 \cdot 10^5 M_{\text{Solar}} \text{ пк}^{-3}$ [Figer et al., 1999; Figer et al., 2002]. Ядро скопления Арки в радиусе составляет около 9'' ($\sim 0,35$ пк на удалении в 8 кпк) [Figer et al., 1999].

Первое детальное наблюдение области скопления в рентгеновском диапазоне, проведённое обсерваторией Chandra [Yusef-Zadeh et al., 2002], выявило, что скопление Арки является ярким рентгеновским источником. В области ядра скопления наблюдается сильное тепловое излучение с характерной линией горячего железа 6,7 кэВ. Такое излучение, исходящее от звёздного скопления, связано с множественными столкновениями сильных звёздных ветров массивных звёзд [Yusef-Zadeh et al., 2002; Wang et al., 2006; Capelli et al., 2011a]. Кроме излучения ядра скопления было обнаружено протяжённое излучение другого происхождения, пространственно соответствующее молекулярному облаку, которое наблюдается вокруг скопления в радиодиапазоне. Излучение в линии Fe K $_{\alpha}$ 6,4 кэВ и степенной континуум указывают на нетепловую природу протяжённого излучения [Wang et al., 2006; Tsujimoto et al., 2007; Capelli et al., 2011b; Tatischeff et al., 2012; Krivonos et al., 2011; Krivonos et al., 2017].

Кузнецова Екатерина Александровна — аспирант, младший научный сотрудник, eakuznetsova@cosmos.ru

Кривonos Роман Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

На данный момент существуют две главные гипотезы о происхождении нетеплового рентгеновского излучения вокруг скопления. Первая предполагает облучение молекулярного облака внешним жёстким рентгеновским источником. При таком сценарии источники, находящиеся вблизи или внутри облака, не подходят из-за требований к рентгеновской светимости [Capelli et al., 2011b] и потоку в линии Fe K $_{\alpha}$ 6,4 кэВ [Tatischeff et al., 2012; Krivonos et al., 2014]. Требуемая рентгеновская светимость может быть обеспечена близким рентгеновским источником, например, прошлой активностью Sgr A*, предположение о возможности которой было выдвинуто Р.А. Сюняевым с соавторами [Sunyaev et al., 1993] для объяснения наблюдаемой флуоресцентной линии излучения гигантского молекулярного облака Sgr B2 в области Галактического центра [Koyama et al., 1996; Sunyaev, Churazov, 1998; Murakami et al., 2000; Revnivtsev et al., 2004; Terrier et al., 2010].

Альтернативной гипотезой является объяснение возникновения флуоресцентной линии молекулярного облака в результате бомбардировки низкоэнергетичными частицами космических лучей [Capelli et al., 2011b; Tatischeff et al., 2012]. Поток континуума нетеплового излучения и поток в линии Fe K $_{\alpha}$ находились на постоянном уровне в течение десяти лет, что было сильным подтверждением гипотезы подогрева космическими лучами молекулярного облака скопления Арки [Tatischeff et al., 2012]. Однако недавно была обнаружена временная переменность нетеплового степенного континуума и линии излучения 6,4 кэВ [Clavel et al., 2014], что противоречит сценарию подогрева космическими лучами [Dogiel et al., 2014]. Тем не менее, остаётся открытым вопрос, упадёт ли до нулевого уровня нетепловое излучение в континууме и в линии, когда рентгеновский высвечивающий фронт вспышки покинет облако, или останется некоторый фоновый уровень излучения, вызванный космическими лучами. Р. Кривonos с соавторами [Krivonos et al., 2017] показали сильное изменение морфологии нетеплового излучения, которое теперь представляет собой три отдельных сгустка. Также был продемонстрирован существенный спад эквивалентной ширины (EW) линии Fe K $_{\alpha}$.

В этой работе мы представляем анализ наблюдений области скопления Арки с помощью NuSTAR, которые были проведены в 2016 г. с целью мониторинга нетеплового излучения вокруг скопления. Дополнительно был проведён детальный спектральный анализ сгустков излучения по данным XMM-Newton 2015 г. Статья структурирована следующим образом: в разделе 1 описываются наблюдения скопления Арки в 2016 г. с помощью NuSTAR и проведение анализа данных; пространственный анализ излучения представлен в разделе 2; широкополосный спектральный анализ данных NuSTAR и XMM-Newton области скопления Арки и спектры сгустков излучения в линии 6,4 кэВ можно найти в разделах 3 и 4 соответственно; полученные результаты обсуждаются в конце статьи.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В 2016 г. проводились наблюдения области скопления Арки обсерваторией NuSTAR в рамках программы NuSTAR Legacy survey (https://www.nustar.caltech.edu/page/legacy_surveys) — исследования молекулярных облаков Sgr A.

Полная экспозиция наблюдений составила 150 кс. Все наблюдения скопления Арки, использованные в этой статье, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Список наблюдений скопления Арки, использовавшихся в этой работе

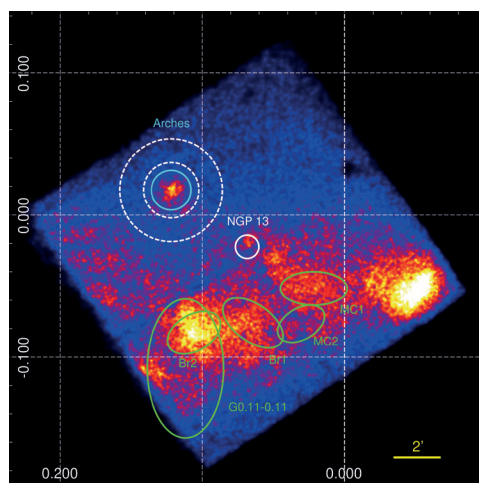
Телескоп	ObsID	Дата начала наблюдений	Экспозиция, с
XMM-Newton	0762250301	2015.09.27 15:48:39	114000
NuSTAR	40101001002	2015.10.19 06:21:08	107189
	40101001004	2015.10.25 13:56:08	107856
	40202001002	2016.10.28 13:16:08	150856

Рентгеновский орбитальный телескоп NuSTAR [Harrison et al., 2013], запущенный в 2012 г., получает изображения с угловым разрешением меньше одной угловой минуты на энергиях выше 10 кэВ, что делает его первым (на данный момент времени) в классе рентгеновских экспериментов с начала рентгеновской астрономии. NuSTAR имеет два идентичных сонаправленных рентгеновских телескопических модуля (FPMA и FPMB) с угловым разрешением 18" (ширина на полувысоте, FWHM). Телескоп NuSTAR работает в широком диапазоне энергий 3–79 кэВ со спектральным разрешением 400 эВ (FWHM) на энергии 10 кэВ.

Стоит отметить, что NuSTAR имеет известную проблему паразитных лучей, которая заключается в загрязнении данных при освещении детекторов рентгеновскими лучами, проходящими вне оптической системы [Madsen et al., 2017]. В связи с этим, данные модуля FPMB были сильно загрязнены фотонами яркого рентгеновского источника GX 3+1, из-за чего пришлось исключить эти данные из рассмотрения. На рис. 1 представлено изображение области скопления Арки в полном диапазоне энергий 3–79 кэВ по данным модуля FPMA. Скопление Арки было расположено в поле зрения телескопа с угловым смещением 4' от оптической оси, что привело к небольшому уменьшению эффективности, однако без сильного искажения функции размытия точечного источника (ФРТИ или Point Spread Function, PSF).

Стоит отметить, что небесные координаты каждого зарегистрированного телескопом NuSTAR фотона подвержены систематическому смещению, которое может достигать 10".

Рис. 1. Изображение в полном рабочем диапазоне 3–79 кэВ по данным NuSTAR/FPMA. Регион источника обозначен голубой окружностью, а фонный — пунктирным кольцом. Также на изображении представлены молекулярные облака Sgr A (зелёные контуры) [Clavel et al., 2013]. Белая окружность — источник жёсткого рентгеновского излучения NGP 13 [Hong et al., 2016]



Мы заметили смещение между положением центроида скопления и его координатами, приведёнными в каталогах, на величину около 3–4". Подобно тому, как сделали авторы работы [Krivonos et al., 2017], мы произвели астрометрическую коррекцию путём смещения координат каждого фотона, используя в качестве контрольного положения центроид скопления Арки, вычисленный в 2012 г. [Krivonos et al., 2014], где заметного систематического смещения зарегистрировано не было.

Мы извлекали спектр области скопления Арки, используя пакет `nuproducts` NuSTAR Data Analysis Software (NUSTARDAS v.1.8.0), что является частью программного обеспечения HEASOFT версии 6.20. В качестве региона для излучения источника был выбран круг с радиусом 50" и центром в положении скопления. Спектр фонового излучения извлекался из кольцевого региона с радиусами в пределах 70–130" с тем же центром, что и для региона источника. Спектральный и пространственный анализ был произведён с помощью пакетов `xspes` [Arnaud et al., 1996] и `Sherpa` [Freeman et al., 2001], которые включены в программные обеспечения HEASOFT и CIAO-v.4.9 [Fruscione et al., 2006] соответственно.

2. MORFOЛОГИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Главный вопрос, которым мы задаёмся в этом разделе, в том, присутствует ли ещё протяжённое излучение вокруг скопления, наблюдаемое в 2012–2015 гг. с помощью NuSTAR [Krivonos et al., 2014, 2017]. Угловое разрешение NuSTAR, составляющее 18", не позволяет нам регистрировать излучение непосредственно от ядра скопления, поэтому мы используем простой двумерный анализ для оценки пространственного распределения скопления, сравнения полученный результат с ожидаемой ФРТИ телескопа.

Для начала мы проанализировали изображение области скопления Арки 2016 г. в полном диапазоне 3–79 кэВ, используя двумерную функцию Гаусса с фиксированным на 4" значением FWHM (эффект колебания штанги телескопа) и свободным центральным положением, что отражает излучение точечного рентгеновского источника. В ходе анализа, модель источника сворачивалась с ФРТИ NuSTAR с учётом распределения карты экспозиции. Для данного анализа область изображения ограничивалась окружностью с радиусом 50" и центром в положении центроида скопления, а фоновая скорость счёта оценивалась в кольцевой области с радиусами от 70 до 130" с тем же центром. Разница между изображением и наиболее подходящей моделью имела сильные отклонения, указывающие на то, что рентгеновское излучение скопления Арки не согласуется с излучением точечного источника. Тогда мы добавили вторую двумерную функцию Гаусса в модель со свободными параметрами FWHM и центральным положением, чтобы численно оценить пространственное расширение излучения вокруг скопления. В связи с недостаточной статистикой был выбран регион источника с большим радиусом ($R = 70''$). Лучшее значение FWHM для свободной двумерной функции Гаусса оказалось равным $32'' \pm 7''$ и превышающим значение FWHM ФРТИ телескопа, равное 18", что говорит о наличии протяжённой составляющей излучения, а центроиды свободной функции Гаусса и функции Гаусса точечного источника были разнесены на

расстояние $13_{-5}^{+8}''$, что указывает на различие происхождения излучений.

Сильные изменения в морфологии по сравнению с данными 2012 г. [Krivonos et al., 2014], наблюдавшиеся в 2015 г., подтверждаются и в 2016 г., что позволило составить суммарные изображения этих наблюдений (рис. 2 и 3) в разных энергетических диапазонах: 3–79, 3–10 и 10–20 кэВ. При этом общая экспозиция изображений составила около 360 кс. На рис. 2, полученном для энергий 3–10 кэВ, хорошо видно излучение самого скопления, а в диапазоне 10–20 кэВ (см. рис. 3) тепловое излучение скопления уже не даёт существенного вклада, зато становится хорошо видимым протяжённое излучение от облака скопления.

Пространственный анализ совместных изображений проводился для трёх диапазонов энергии (3–79, 3–10, 10–20 кэВ) с такой же моделью, что и анализ с двумя двумерными функциями Гаусса. Результаты приведены в табл. 2. Как и для данных 2016 г., FWHM свободной двумерной функции Гаусса значительно превышает значение FWHM ФРТИ телескопа NuSTAR (18''), из чего с уверенностью можно сказать о присутствии протяжённой компоненты излучения. Кроме того, для суммарных изображений центроиды излучения скопления и протяжённой компоненты хорошо разрешаются и определяются более точно, чем для единичных наблюдений. На рис. 4 и 5 представлены детальные изображения скопления Арки в диапазоне 3–10 кэВ, на который наложены 1-, 2- и 3- σ доверительные интервалы координат центроидов обеих компонент излучения и три ярких источника A1S/N и A2, описанные в работе [Wang et al., 2006].

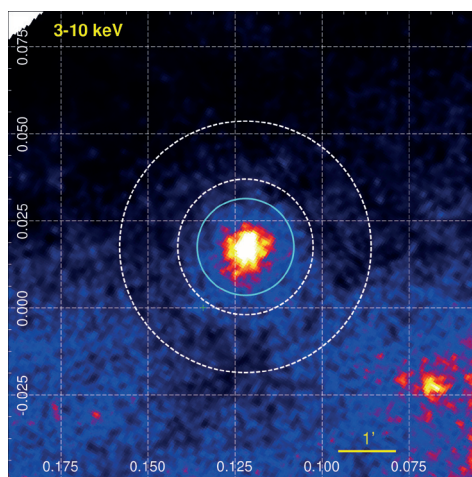


Рис. 2. Суммарное изображение области скопления Арки в диапазоне 3–10 кэВ по данным NuSTAR 2015–2016 гг. Голубым выделена область источника, белый пунктир — фоновая область

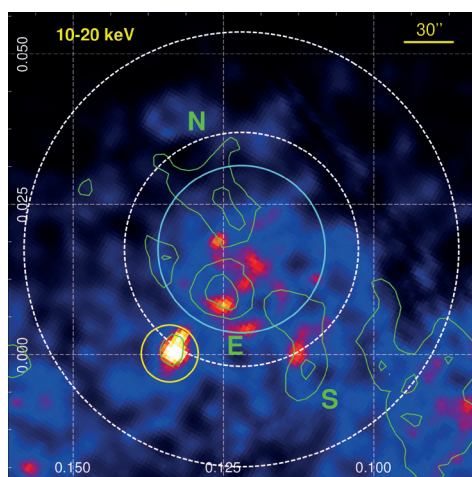


Рис. 3. Суммарное изображение области скопления Арки в диапазоне 10–20 кэВ по данным NuSTAR 2015–2016 гг. Голубым выделена область источника, белый пунктир — фоновая область. На изображение наложены зелёные контуры сгустков излучения в линии 6,4 кэВ, представленные в работе [Krivonos et al., 2017]. Жёлтым цветом выделен источник жёсткого рентгеновского излучения CXOGCS J174555.8-284914

Излучение скопления пространственно согласуется с положением источников A1S и A1N (см. верхний правый угол рис. 4) звёздного скопления.

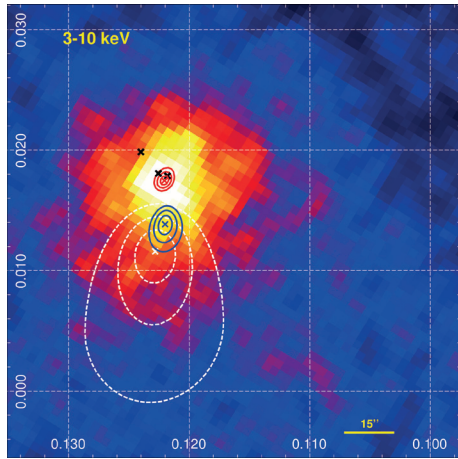


Рис. 4. Приближённое изображение области скопления Арки в диапазоне 3–10 кэВ. Красные и синие контуры — 1-, 2- и 3-σ доверительные интервалы для центроидов ядра и облака соответственно. Белые пунктирные контуры соответствуют доверительным интервалам для центроида протяжённого излучения, вычисляемого в диапазоне 10–20 кэВ. Также на рисунке представлены положения точечных рентгеновских источников A1S/N и A2 [Wang et al., 2006]

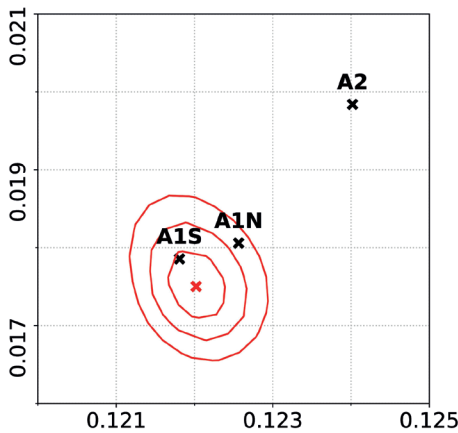


Рис. 5. Увеличенное изображение контуров ядра скопления с рис. 4 относительно точечных источников A1S/N и A2 [Wang et al., 2006]

Таблица 2. Результаты пространственного анализа области скопления Арки

	Диапазон энергии, кэВ		
	3–79	3–10	10–20
Ядро (двумерная функция Гаусса)			
RA (J2000) центра	17:45:50,52	17:45:50,54	
Dec (J2000) центра	–28:49:22,41	–28:49:22,38	
FWHM	4'' (фикс.)	4'' (фикс.)	
Нормировка ($\times 10^{-3}$)	3,77±0,46	3,65±0,44	
Облако (двумерная функция Гаусса)			
RA (J2000) центра	17:45:51,48	17:45:51,38	17:45:52,02
Dec (J2000) центра	–28:49:30,28	–28:49:29,33	–28:49:31,03
FWHM	43'',9±3'',7	39'',6±3'',5	59'',6 ^{+13'',1} _{-9'',5}
Нормировка ($\times 10^{-3}$)	63,8±11,8	62,2±12,9	6,0±1,5

Кроме того, в близком расположении от скопления Арки находится источник жёсткого рентгеновского излучения, который, скорее всего не связан со скоплением (выделен жёлтой окружностью на рис. 3). Этот источник наблюдался также и в других работах по скоплению Арки [Yusef-Zadeh et al., 2002; Law et al., 2004]. Мы нашли источник по координатам в каталоге SIMBAD [Wenger et al., 2000] и идентифицировали его как объект CXOGCS J174555.8-284914. В работе [Law et al., 2004] было определено, что источник сильно поглощён ($N_H \sim 4 \cdot 10^{23} \text{ см}^2$) и имеет жёсткий спектр (индекс степенного закона $\sim 1,5$) с пиком, близким к линии 6,4 кэВ. В анализе данных скопления Арки данный источник не учитывался.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В этом разделе мы приводим детали индивидуального спектрального анализа наблюдения NuSTAR 2016 г. и совместного — для данных NuSTAR и XMM-Newton за 2015–2016 гг.

Области для извлечения информации об излучениях источника и фона были выбраны, как показано на рис. 1. Излучение скопления Арки, связанное с множественными столкновениями звёздных ветров, характеризуется тепловым излучением с сильной линией горячего железа 6,7 кэВ. Такое излучение хорошо описывается моделью АРЕС, учитывающей тепловое излучение оптически тонкой плазмы. Эта модель описывается следующими параметрами: температурой плазмы (kT), металличностью (Z/Z_{solar}) и нормировкой в единицах $10^{-18} \int n_e n_H dV / (4\pi D^2)$, где n_e и n_H — плотности числа электронов и протонов в см^{-3} ; D — расстояние до скопления в см. Металличность на протяжении всей работы зафиксирована на значении $Z = 1,7Z_{\text{solar}}$, определённом в статье [Tatischeff et al., 2012]. Нетепловое излучение молекулярного облака скопления Арки может быть описано степенным законом (power law) и функцией Гаусса (Gaussian) для линии нейтрального железа 6,4 кэВ. Параметрами модели степенного закона являются его показатель Γ и нормировка, а параметры функции Гаусса — ширина линии $\Delta E_{6,4 \text{ кэВ}}$, которая была зафиксирована на значении 0,1 кэВ из-за ограниченности спектрального разрешения NuSTAR, поток в ней $F_{6,4 \text{ кэВ}}$ и центральное положение функции Гаусса $E_{6,4 \text{ кэВ}}$. Кроме того, для описания излучения в линии 6,4 кэВ вычислялась её эквивалентная ширина $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$. Все спектральные модели были скорректированы на межзвёздное поглощение, описываемое моделью W_{abs} . В связи с тем, что по данным NuSTAR нельзя дать ограничения на значение поглощения, мы использовали результат работы [Tatischeff et al., 2012] и фиксировали значение $N_H = 9,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Таким образом, итоговая модель имела вид: W_{abs} (АРЕС + Gaussian + powerlaw). На всех изображениях спектров, представленных далее, модели АРЕС, powerlaw и Gaussian выделены красной, синей и зелёной линиями соответственно.

Спектр 2016 г хорошо аппроксимируется моделью W_{abs} (АРЕС + Gaussian + powerlaw) (рис. 6). Мы зафиксировали температуру тепловой компоненты АРЕС на значении $kT = 2,4 \text{ кэВ}$, поскольку комбинирование этой модели со степенным законом приводит к вырождению параметров температуры АРЕС и наклона Γ .

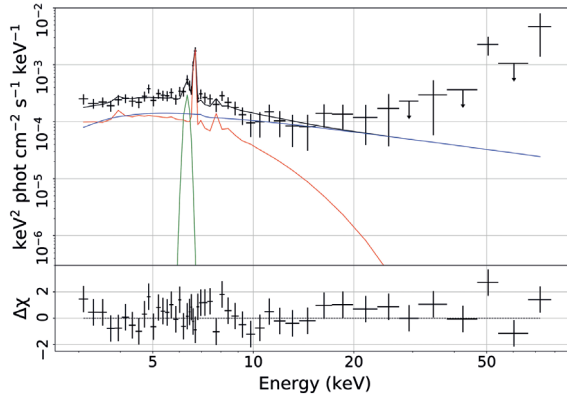


Рис. 6. Спектр 50''-области скопления Арки по данным FPMA NuSTAR 2016 г. (3–70 кэВ)

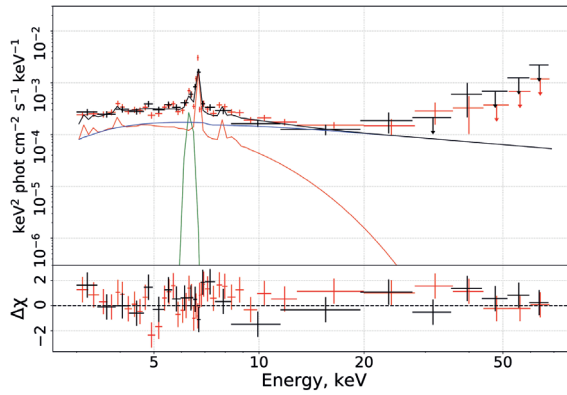


Рис. 7. Спектр 50''-области скопления Арки по данным FPMA NuSTAR 2015–2016 гг. (3–70 кэВ). Красные точки — данные 2015 г, чёрные — 2016 г.

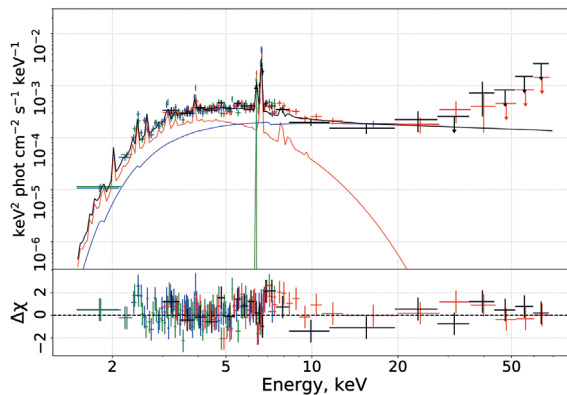


Рис. 8. Совместный спектр по данным XMM-Newton 2015 г. (1,5–7,5 кэВ) и NuSTAR 2015–2016 гг. (3–70 кэВ). Чёрные и красные точки относятся к данным NuSTAR 2016 и 2015 гг., а зелёные и синие — MOS1/MOS2 и PN XMM-Newton

Полученные спектральные параметры согласуются с параметрами, определёнными по данным NuSTAR 2015 г., как демонстрируется в табл. 3. Отсутствие изменения в потоке для 3–20 кэВ указывает на то, что излучение скопления и облака не изменилось с 2015 г. На прежнем уровне остались значение потока в линии 6,4 кэВ, её эквивалентная ширина, показатель степенного закона и нормировка АРЕС, что также говорит о неизменности излучения.

Для получения более точных оценок мы провели совместный анализ спектров 2015 и 2016 гг. Последний столбец табл. 3 содержит результаты этого анализа. Каждый набор данных корректировался на фактор кросс-калибровки. Совместный спектр представлен на рис. 7. Чёрные точки соответствуют данным 2016 г., красные — 2015 г. Видно, что форма спектра 2016 г. повторяет 2015 г.

Таблица 3. Лучшие параметры спектральной модели W_{abs} (АРЕС+Gaussian+powerlaw), полученные при спектральном анализе круговой области скопления с радиусом 50'' по данным NuSTAR

Параметр	Единицы	2015 г.	2016 г.	2015–2016 гг.
N_H	10^{22} см^{-2}	9,5 (фикс.)	9,5 (фикс.)	9,5 (фикс.)
kT	кэВ	$2,4^{+1,5}_{-0,4}$	2,4 (фикс.)	2,4 (фикс.)
I_{kT}	см. данный раздел	$9,2 \pm 5,3$	$8,4^{+2,1}_{-4,4}$	$9,1^{+1,2}_{-1,4}$
$\Delta E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	0,1 (фикс.)	0,1 (фикс.)	0,1 (фикс.)
$E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	$6,34 \pm 1,12$	$6,3 \pm 0,3$	$6,32 \pm 0,11$
$F_{6,4 \text{ кэВ}}$	$10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,6 \pm 1,5$	$2,5^{+3,1}_{-1,7}$	$2,40^{+1,17}_{-1,10}$
$EW_{6,4 \text{ кэВ}}$	эВ	450 ± 150	580 ± 250	540 ± 140
Γ		$2,41^{+0,58}_{-0,34}$	$2,7^{+0,4}_{-0,5}$	$2,56 \pm 0,19$
$F_{3-20 \text{ кэВ}}^{\text{pow}}$	$10^{-13} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5,58^{+1,15}_{-0,91}$	$4,4^{+2,1}_{-3,1}$	$5,8^{+0,8}_{-0,7}$
$\chi_r^2/d.o.f$		0,97/364	0,82/204	0,91/574

Чтобы получить ограничения на величину поглощения, данные ХММ-Newton, полученные в 2015 г. были проанализированы совместно с данными NuSTAR. Для этого мы использовали ту же модель, но со свободным параметром N_H , а ширину линии 6,4 кэВ зафиксировали на значении 0,01 кэВ, из-за более хорошего спектрального разрешения ХММ-Newton, также мы освободили параметр kT для теплового излучения плазмы. Кроме того, параметр кросс-калибровки между данными ХММ-Newton 2015 г. и NuSTAR 2016 г. оказался ниже ожидаемого значения и составил $C = 0,69 \pm 0,04$. В табл. 4 приведены параметры спектральной модели для данных ХММ-Newton 2015 г. и NuSTAR 2015–2016 гг. Параметр N_H был определён на значении $(9,3 \pm 0,5) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, что согласуется с результатом работы [Tatischeff et al., 2012]: $N_H = (9,5 \pm 0,3) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Полученный совместный спектр представлен на рис. 8.

Таблица 4. Лучшие параметры спектральной модели W_{abs} (APEC+Gaussian+powerlaw) по данным XMM-Newton 2015 г. и NuSTAR 2015–2016 гг.

Параметр	Единицы	Значение
N_H	10^{22} см^{-2}	$9,29 \pm 0,5$
kT I_{kT}	кэВ см. данный раздел	$1,95^{+0,16}_{-0,12}$ $16,7 \pm 2,9$
$\Delta E_{6,4 \text{ кэВ}}$ $E_{6,4 \text{ кэВ}}$ $F_{6,4 \text{ кэВ}}$ $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ кэВ $10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ эВ	0,01 (фикс.) $6,38 \pm 0,03$ $3,0 \pm 0,6$ 660 ± 80
Γ $F_{3-20 \text{ кэВ}}^{\text{pow}}$	$10^{-13} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,21 \pm 0,15$ 33^{+13}_{-9}
C		$0,69 \pm 0,04$
$\chi_r^2/d.o.f$		$0,97/1167$

4. АНАЛИЗ СГУСТКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЛАКА СКОПЛЕНИЯ АРКИ

Чтобы исследовать нетепловое излучение вокруг скопления Арки, мы использовали данные XMM-Newton 2015 г. для проведения его спектрального анализа. Мы не могли использовать наблюдения NuSTAR, поскольку его ФРТИ является слишком широкой для столь детального исследования. Анализ данных XMM-Newton был описан в работе [Krivonos et al., 2017].

Морфология излучения молекулярного облака вблизи скопления Арки показывает их разделившуюся структуру. Протяжённое излучение выглядит как три ярких сгустка, которые расположены на востоке (E), на юге (S) и на севере (N) от скопления. Подписи сгустков даны в соответствии с работой [Krivonos et al., 2017]. Мы провели спектральный анализ для каждого сгустка по данным XMM-Newton в диапазоне 2–7,5 кэВ, за исключением сгустка E, для которого диапазон составил 2–7,3 кэВ. Спектры анализировались с помощью модели $W_{\text{abs}}((\text{APEC}+\text{Gaussian}+\text{powerlaw})+\text{Gaussian})$, включающей ещё одну функцию Гаусса для описания линии излучения серы 2,45 кэВ, которая хорошо видна в спектрах сгустков. Возможно, её появление в спектрах сгустков связано с недостаточно хорошим вычитанием фона. Здесь компонента модели APEC описывает уже не тепловое излучение скопления Арки, а излучение астрофизической плазмы, которое делает вклад в фоновое излучение. Показатель степенного закона был зафиксирован на значении 1,6 в соответствии с работой [Clavel et al., 2014], чтобы было возможным сравнение между собой параметров поглощения и излучения в линиях для каждого сгустка. Эквивалентная ширина линий излучения железа и серы вычислялась только с учётом степенного закона. Полученные спектральные параметры приведены в табл. 5. Спектр наиболее яркого сгустка S представлен на рис. 9. Остальные спектры мы не приводим, так как они имеют аналогичный вид.

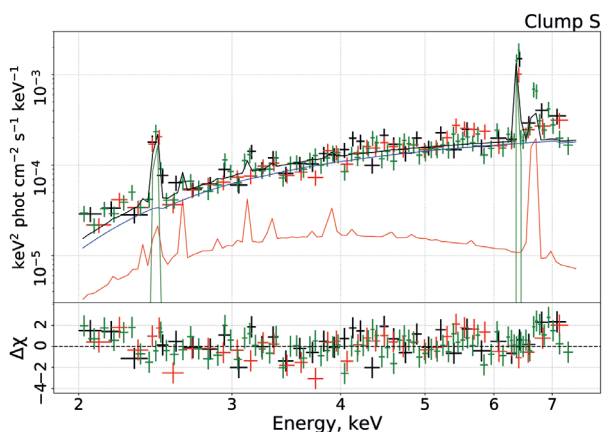


Рис. 9. Спектр сгустка S, полученный по данным XMM-Newton 2015 г., в диапазоне 2–7,5 кэВ. Чёрные, красные и зелёные точки соответствуют данным MOS1, MOS2 и PN

Таблица 5. Параметры спектральной модели $W_{\text{abs}}((\text{APEC} + \text{Gaussian} + \text{powerlaw}) + \text{Gaussian})$ для сгустков излучения в диапазоне 2–7,5 кэВ по данным XMM-Newton 2015 г.

Параметр	Единицы	Сгусток S	Сгусток N	Сгусток E
N_H	10^{22} см^{-2}	$5,5 \pm 0,5$	$7,2 \pm 1,0$	$8,2 \pm 1,1$
kT	кэВ	2,2 (фикс.)	2,2 (фикс.)	2,2 (фикс.)
I_{kT}	см. раздел 3	$0,9 \pm 0,5$	$1,7 \pm 0,6$	$1,3 \pm 0,5$
$\Delta E_{2,45 \text{ кэВ}}$	кэВ	0,01 (фикс.)	0,01 (фикс.)	0,01 (фикс.)
$E_{2,45 \text{ кэВ}}$	кэВ	$2,453 \pm 0,013$	$2,46 \pm 0,03$	$2,37 \pm 0,06$
$F_{2,45 \text{ кэВ}}$	$10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5,3^{+1,8}_{-1,5}$	$4,3^{+3,0}_{-2,1}$	$4,9^{+4,0}_{-2,8}$
$EW_{2,45 \text{ кэВ}}$	эВ	260 ± 40	710 ± 150	1500 ± 400
$\Delta E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	0,01 (фикс.)	0,01 (фикс.)	0,01 (фикс.)
$E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	$6,391 \pm 0,018$	$6,39 \pm 0,03$	$6,35 \pm 0,03$
$F_{6,4 \text{ кэВ}}$	$10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,6 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$
$EW_{6,4 \text{ кэВ}}$	эВ	570 ± 50	980 ± 170	830^{+210}_{-190}
Γ	$10^{-13} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	1,6 (фикс.)	1,6 (фикс.)	1,6 (фикс.)
$F_{3-20 \text{ кэВ}}^{\text{pow}}$		$9,1 \pm 0,8$	$2,9 \pm 0,7$	$3,0 \pm 0,6$
C^2		$1,02 \pm 0,05$	$0,72 \pm 0,06$	$1,1 \pm 0,1$
$\chi_r^2/d.o.f$		1,33/151	1,18/54	1,07/53

Сгусток S является самым ярким среди остальных в линии 6,4 кэВ и излучении в континууме. Он имеет меньшие значения поглощения N_H и EW в линии Fe K α , чем другие два сгустка, но более ярк в степенном континууме и в линии 6,4 кэВ. Поскольку он имеет небольшую эквивалентную ширину по отношению к сгусткам N и E, в то время как его поток в линии 6,4 кэВ превышает потоки остальных, сгусток S выглядит более слабым в изображении в линии 6,4 кэВ. Спектральные параметры двух других сгустков аналогичны,

что может указывать на одинаковую природу их излучения. Разница в значениях N_H может быть связана с различиями в относительных расстояниях между сгустками.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы продолжаем наблюдения скопления Арки, поскольку от него замечаются быстрые временные, спектральные и пространственные вариации нетеплового излучения.

Наблюдения скопления Арки с помощью NuSTAR в 2016 г. показали, что нетепловая компонента излучения всё ещё присутствует вокруг скопления, что подтверждается как спектральным, так и пространственным анализом. Нетепловая компонента излучения не связана с излучением ядра скопления. Затухание потока в линии 6,4 кэВ и потока в континууме не наблюдалось с 2015 г., что может указывать на возможный подогрев молекулярного облака низкоэнергетическими космическими лучами или на отражение ещё одной вспышки рентгеновского источника.

Параметры спектра не показали существенных изменений с 2015 г., а паде-ние эквивалентной ширины, обнаруженное в 2015 г. [Krivonos et al., 2017], подтвердилось и в 2016 г. Поток в диапазоне 3–20 кэВ по данным 2016 г. остался на том же уровне, что и в 2015 г. Также мы провели совместный спектральный анализ данных 2015–2016 гг. NuSTAR и 2015 г. XMM-Newton. Получены спектры сгустков излучения облака скопления Арки, которые видны в линии Fe K α 6,4 кэВ как три отдельных области. Их анализ позволил оценить эквивалентную ширину линии излучения 6,4 кэВ и величину поглощения для каждого сгустка.

Как было отмечено в предыдущих работах, переменное нетепловое излучение облака скопления Арки скорее всего связано с прошлой активностью Sgr A*. Наблюдаемая в данный момент постоянная компонента возможно связана с ионизацией облака космическими лучами низких энергий. Для проверки данной гипотезы необходимы дальнейшие наблюдения области скопления Арки.

ЛИТЕРАТУРА

- [Arnaud et al., 1996] *Arnaud K. A.* XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V. A. S. P. Conference Series. V. 101 / eds. G. H. Jacoby, J. Barnes.* 1996. P. 17.
- [Capelli et al., 2011a] *Capelli R., Warwick R. S., Cappelluti N., Gillessen S., Predehl P., Porquet D., Czesla S.* Discovery of X-ray flaring activity in the Arches cluster // *Astronomy and Astrophysics.* 2011. V. 525. P. L2.
- [Capelli et al., 2011b] *Capelli R., Warwick R. S., Porquet D., Gillessen S., Predehl P.* Fe K α line emission from the Arches cluster region — evidence for ongoing particle bombardment? // *Astronomy and Astrophysics.* 2011. V. 530. P. A38.
- [Clavel et al., 2013] *Clavel M., Terrier R., Goldwurm A., Morris M. R., Ponti G., Soldi S., Trap G.* Echoes of multiple outbursts of Sagittarius A* revealed by Chandra // *Astronomy and Astrophysics.* 2013. V. 558. P. A32.

- [Clavel et al., 2014] *Clavel M., Soldi S., Terrier R., Tatischeff V., Maurin G., Ponti G., Goldwurm A., Decourchelle A.* Variation of the X-ray non-thermal emission in the Arches cloud // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 443. Iss. 1. P. L129–L133.
- [Cotera et al., 1996] *Cotera A. S., Erickson E. F., Colgan S. W. J., Simpson J. P., Allen D. A., Burton M. G.* The Discovery of Hot Stars near the Galactic Center Thermal Radio Filaments // Astrophysical J. 1996. V. 461. P. 750. DOI: 10.1086/177099.
- [Dogiel et al., 2014] *Dogiel V. A., Chernyshov D. O., Kiselev A. M., Cheng K.-S.* On the origin of the 6.4 keV line in the Galactic Center region // Astroparticle Physics. 2014. V. 54. P. 33–39.
- [Figer et al., 1999] *Figer D. F., Kim S. S., Morris M., Serabyn E., Rich R. M., McLean I. S.* Hubble Space Telescope/NICMOS Observations of Massive Stellar Clusters near the Galactic Center // Astrophysical J. 1999. V. 525. Iss. 2. P. 750–758.
- [Figer et al., 2002] *Figer D. F., Najarro F., Gilmore D. et al.* Massive Stars in the Arches Cluster // Astrophysical J. 2002. V. 581. Iss. 1. P. 258–275.
- [Freeman et al., 2001] *Freeman P., Doe S., Siemiginowska A.* Sherpa: a Mission-Independent Data Analysis Application // Proc. SPIE Conf. V. 4477. Astronomical Data Analysis. 2001. P. 76–87. arXiv:astro-ph/0108426. DOI: 10.1117/12.447161.
- [Fruscione et al., 2006] *Fruscione A., McDowell J. C., Glenn E. A. et al.* CIAO: Chandra’s data analysis system // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conf. Series: Proc. 2006. P. 62701V. DOI: 10.1117/12.671760.
- [Harrison et al., 2013] *Harrison F. A., Craig W. W., Christensen F. E. et al.* The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) High-energy X-Ray Mission // Astrophysical J. 2013. V. 770. Iss. 2. P. 103.
- [Hong et al., 2016] *Hong J., Mori K., Hailey C. J. et al.* NuSTAR Hard X-Ray Survey of the Galactic Center Region. II. X-Ray Point Sources // Astrophysical J. 2016. Iss. 2. V. 825. P. 132.
- [Koyama et al., 1996] *Koyama K., Maeda Y., Sonobe T., Takeshima T., Tanaka Y., Yamauchi S.* ASCA View of Our Galactic Center: Remains of Past Activities in X-Rays? // Publ. Astron. Soc. Japan. 1996. V. 48. P. 249–255.
- [Krivonos et al., 2014] *Krivonos R. A., Tomsick J. A., Bauer F. E. et al.* First Hard X-Ray Detection of the Non-thermal Emission around the Arches Cluster: Morphology and Spectral Studies with NuSTAR // Astrophysical J. 2014. V. 781. P. 107.
- [Krivonos et al., 2017] *Krivonos R., Clavel J., Hong K., Mori G., Ponti J., Poutanen F., Rahoui J., Tomsick J., Tsygankov S.* NuSTAR and XMM-Newton observations of the Arches cluster in 2015: fading hard X-ray emission from the molecular cloud // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2017. V. 468. P. 2822–2835.
- [Law et al., 2004] *Law C., Yusef-Zadeh F.* X-Ray Observations of Stellar Clusters Near the Galactic Center // Astrophysical J. 2004. V. 611. No. 2. P. 858.
- [Madsen et al., 2017] *Madsen K. K., Christensen F. E., Craig W. W., Forster K. W., Grenfentette B. W., Harrison F. A., Miyasaka H., Rana V.* Observational Artifacts of NuSTAR: Ghost Rays and Stray Light. 2017. arXiv:1711.02719.
- [Murakami et al., 2000] *Murakami H., Koyama K., Sakano M., Tsujimoto M., Maeda Y.* ASCA Observations of the Sagittarius B2 Cloud: An X-Ray Reflection Nebula // Astrophysical J. 2000. V. 534. P. 283.
- [Revnivtsev et al., 2004] *Revnivtsev M. G., Churazov E. M., Sazonov S. Yu. et al.* Hard X-ray view of the past activity of Sgr A in a natural Compton mirror // Astronomy and Astrophysics. 2004. V. 425. P. L49–L52.
- [Serabyn et al., 1998] *Serabyn E., Shupe D., Figer D. F.* An extraordinary cluster of massive stars near the centre of the Milky Way // Nature. 1998. V. 394. Iss. 6692. P. 448–451.
- [Sunyaev, Churazov, 1998] *Sunyaev R., Churazov E.* Equivalent width, shape and proper motion of the iron fluorescent line emission from molecular clouds as an indicator of the illuminating source X-ray flux history // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1998. V. 297. Iss. 4. P. 1279–1281.

- [Sunyaev et al., 1993] *Sunyaev R. A., Markevitch M., Pavlinsky M.* The Center of the Galaxy in the Recent Past: A View from GRANAT // *Astrophysical J.* 1993. V. 407. P. 606.
- [Tatischeff et al., 2012] *Tatischeff V., Decourchelle A., Maurin G.* Press Release Free Access Non-thermal X-rays from low-energy cosmic rays: application to the 6.4 keV line emission from the Arches cluster region // *Astronomy and Astrophysics.* 2012. V. 546. P. A88.
- [Terrier et al., 2010] *Terrier R., Ponti I G., Bélanger G.* et al. Fading Hard X-Ray Emission From the Galactic Center Molecular Cloud Sgr B2 // *Astrophysical J.* 2010. V. 719. No. 1. P. 143.
- [Tsujiimoto et al., 2007] *Tsujiimoto M., Hyodo Y., Koyama K.* Suzaku Spectroscopic Study of Hard X-Ray Emission in the Arches Cluster // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2007. V. 59. P. 229–235.
- [Wang et al., 2006] *Wang Q. D., Dong H., Lang C.* The interplay between star formation and the nuclear environment of our Galaxy: deep X-ray observations of the Galactic centre Arches and Quintuplet clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2006. V. 371. Iss. 1. P. 38–54.
- [Wenger et al., 2000] *Wenger M., Ochsenbein F., Egret D.* et al. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // *Astronomy and Astrophysics.* 2000. V. 143. P. 9–22.
- [Yusef-Zadeh et al., 2002] *Yusef-Zadeh F., Law C., Wardle M., Wang Q. D., Fruscione A., Lang C. C., Cotera A.* Detection of X-Ray Emission from the Arches Cluster near the Galactic Center // *Astrophysical J.* 2002. V. 570. Iss. 2. P. 665–670.

NUSTAR AND XMM-NEWTON MONITORING OF THE NON-THERMAL EMISSION AROUND THE ARCHES CLUSTER

E. Kuznetsova, R. Krivonos

Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI RAN)

Recent *NuSTAR* and *XMM-Newton* observations of the molecular cloud around the Arches cluster demonstrate a dramatic change both in morphology and intensity of the non-thermal emission, similar to that observed in the Central Molecular Zone (CMZ) of the Galactic Center (GC). Strong variations of the molecular clouds support the X-ray reflection mechanism of fluorescence observed in CMZ and reveal propagation of illuminating fronts, presumably induced by the past flaring activity of Sgr A*. We continue monitoring campaign of the Arches cluster with *NuSTAR* and will present results based on the recent observations, revealing the current intensity level of the non-thermal emission from the molecular cloud.

Keywords: non-thermal emission, stellar cluster, molecular cloud, the Galactic Center region, the Arches cluster, X-ray emission

Kuznetsova Ekaterina — graduate student, junior researcher, eakuznetsova@cosmos.ru
Krivonos Roman — senior researcher, PhD

СПЕКТРЫ CO₂ ЛЬДА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА МАРСЕ ПО ДАННЫМ СПИКАМ/«МАРС-ЭКСПРЕСС»: СРАВНЕНИЕ С ЛАБОРАТОРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

А. Ломакин^{1,2}, А. А. Федорова¹, О. И. Кораблев¹, Ф. Монтмессан³, Б. А. Воронин⁴

¹ Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия

³ Лаборатория исследований атмосферы, окружающей среды и космоса Национального центра научных исследований (LATMOS CNRS), Франция

⁴ Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), Томск, Россия

Целью данной работы является получение спектра отражения углекислого газа CO₂ льда высокого спектрального разрешения по данным эксперимента СПИКАМ ИК на борту КА «Марс-Экспресс». Для этих целей был разработан алгоритм очищения наблюдаемых спектрометром спектров Марса в диапазоне 1–1,7 мкм от влияния поглощения атмосферными газами для конкретных условий наблюдений с использованием последней версии спектроскопической базы HITRAN для молекул H₂O и CO₂ и модели общей циркуляции Марса MCD v5.3. Полученные спектры льда сравниваются с существующими сейчас лабораторными измерениями. Результаты работы будут в дальнейшем использованы для исследования сезонных и междугловых вариаций отложения льдов на поверхности Марса.

Ключевые слова: спектроскопия, Марс, CO₂ лёд, отражательная способность

ВВЕДЕНИЕ

Цикл углекислого газа (CO₂) на Марсе определяет фундаментальные процессы как на поверхности, так и в атмосфере. На полюсах конденсация большой доли атмосферы (до 30 %) приводит к сезонной растительности и отступлению полярных шапок [Riqueux et al., 2015], изменяя альбедо поверхности и излучательную способность, что имеет глобальные последствия для энергетического бюджета [Paige, Wood, 1992], а также меняет местный и глобальный климат и погоду на планете [Hourdin et al., 1993; Kahre, Haberle, 2010].

Инфракрасная спектроскопия является одним из способов дистанционного зондирования углекислого льда на Марсе. CO₂ лёд имеет характерные резкие полосы в ближнем ИК-диапазоне, которые позволяют отличить его

Ломакин Александр Александрович — старший лаборант, бакалавр, aleksander.lomakin96@gmail.com

Федорова Анна Александровна — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, fedorova@iki.rssi.ru

Кораблев Олег Игоревич — заведующий отделом физики планет, доктор физико-математических наук, korab@iki.rssi.ru

Монтмессан Франк — научный сотрудник, Ph.D., Franck.Montmessin@latmos.ipsl.fr

Воронин Борис Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, vba@iao.ru

от полос поглощения углекислого газа в атмосфере. Эти полосы позволили картировать распределение и сезонную эволюцию конденсации и сублимации углекислого льда на полярных шапках. Начиная с 2004 г. в инфракрасном диапазоне зондирования льда проводят такие эксперименты как OMEGA на КА «Марс-Экспресс» и CRISM на КА Mars-Reconnaissance Orbiter [Brown et al., 2010; Langevin et al., 2007]. Между тем, спектр углекислого льда в ближнем ИК-диапазоне до сих пор хорошо не известен, поскольку картирующие спектрометры низкого разрешения не позволяют увидеть слабые резкие полосы.

Спектрометр СПИКАМ ИК (один из ИК-спектрометров на борту на КА «Марс-Экспресс») был первым на орбите Марса, выполнившим измерения углекислого льда с относительно высоким разрешением (разрешающей способностью 2000) в ближнем ИК-диапазоне [Korablev et al., 2006]. Это позволило увидеть ранее не идентифицированные резкие детали льда, между тем детально массив данных эксперимента никогда не анализировался. Целью работы является разработка алгоритма удаления спектральных деталей атмосферы для получения спектра отражения поверхности Марса по данным СПИКАМ ИК, а также сравнение полученных спектров поверхности над южной полярной шапкой Марса с известными лабораторными измерениями сухого льда.

1. НАБЛЮДЕНИЯ

Спектрометр СПИКАМ ИК, установленный на космическом аппарате «Марс-Экспресс», является аппаратной частью эксперимента СПИКАМ, наряду с УФ- и ИК-спектрометрами [Bertaux et al., 2005]. Инфракрасный спектрометр работает в спектральном диапазоне от 1 до 1,7 мкм, имеет два детектора, принимающие сигнал в двух различных поляризациях [Korablev et al., 2006]. В основе ИК-канала лежит акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ), в который подаётся радиочастота от 80 до 140 МГц, определяющая длину волны. Минимальный шаг по частоте равен 16 кГц, что соответствует шагу 0,1 нм на нижней границе (1 мкм) и 0,3 нм на верхней (1,7 мкм). Спектральное разрешение приблизительно постоянно в рабочем диапазоне волновых чисел и составляет 3,5–4 см⁻¹. Разрешающая сила меняется по спектральному диапазону от 1600 до 2800.

За 14 лет наблюдений спектрометр собрал огромный массив данных, далеко не все из которых были обработаны. Разрешающая способность прибора позволяет увидеть достаточно узкие спектральные особенности на поверхности планеты, что делает его удобным инструментом для мониторинга сезонных изменений CO₂ льда, так как можно детектировать даже очень маленькое количество льда на поверхности планеты. Для исследования спектра углекислого льда полный спектр СПИКАМ в диапазоне 1–1,7 мкм был записан на двух орбитах: 6682 (17.03.2009) и 6709 (25.03.2009) — над постоянной южной полярной шапкой в начале лета в южном полушарии Ls ~ 230°, где глубина полос была максимальна.

Момент попадания полюса в поле зрения прибора достаточно легко заметить и без какой-либо обработки данных: полосы поглощения CO₂ льда достаточно широкие и сильные (рис. 1, см. с. 63).

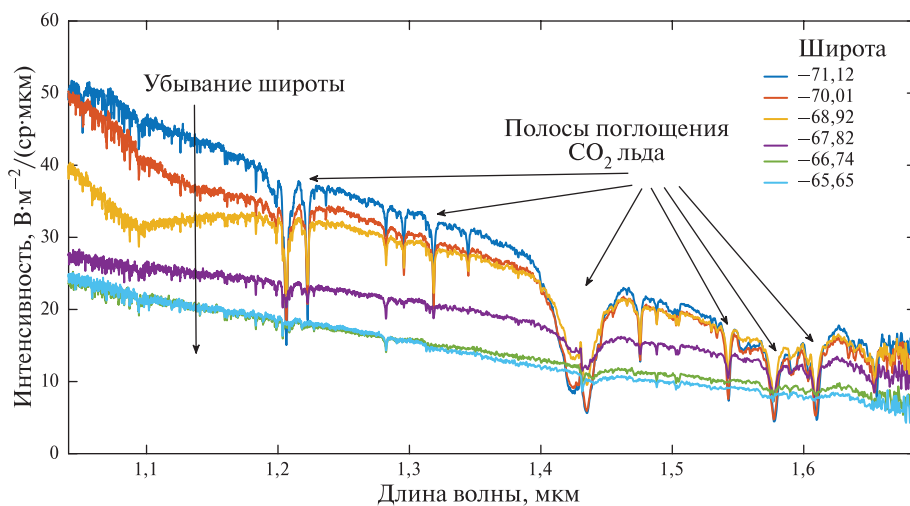


Рис. 1 Спектр СПИКАМ ИК на орбите 6682 по мере убывания широты

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

СПИКАМ ИК осуществляет зондирование поверхности и атмосферы в режиме надирных измерений, как видно на рис. 2. В ближнем ИК-диапазоне спектрометр измеряет отражённое от поверхности планеты солнечное излучение, дважды прошедшее через атмосферу, где происходит поглощение излучения в линий атмосферных газов.

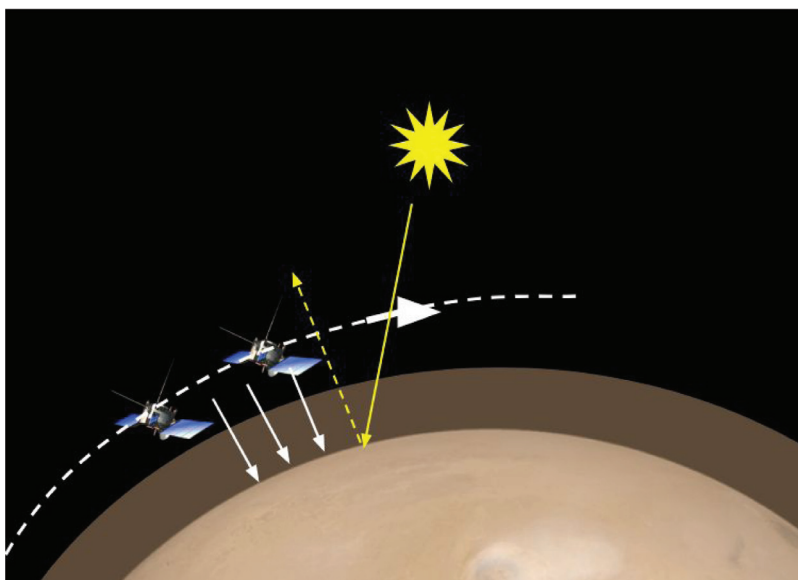


Рис. 2. Схема надирных наблюдений

Спектрометр измеряет интенсивность излучения в единицах Вт/(м²·мкм·ср). Для получения отражательной способности поверхности необходимо поделить измеренное излучение на поток солнечного излучения на орбите Марса и косинус угла падения. В приближении беспылевой атмосферы поглощение солнечного излучения при прохождении через атмосферу можно описать с помощью закона Бугера — Ламберта — Бера. Итоговый коэффициент отражения будет иметь вид:

$$R = \frac{I(\lambda)}{\left(\frac{\Phi_\lambda}{\pi(r_{Mars})^2} \right) \mu_0 \cdot e^{-\tau(\lambda)}}$$

здесь Φ_λ — солнечный поток на одной астрономической единице (а.е.) в Вт/(м²·мкм·ср); r_{Mars} — расстояние от Марса до Солнца в а.е.; $\tau(\lambda)$ — оптическая толщина атмосферы; $\mu_0 = \cos(i)$, где i — солнечный зенитный угол; $I(\lambda)$ — измеренная прибором интенсивность излучения, пришедшего от Марса.

2.1. Солнечный спектр

При предыдущих обработках данных СПИКАМ использовался комбинированный солнечный спектр [Fiorenza, Formisano, 2005], который состоял из данных наблюдений, полученных со средним спектральным разрешением около 1 см⁻¹ и теоретического спектра, когда наблюдения были недоступны. В диапазон 1,38 мкм, где солнечный спектр плохо известен из-за окна непрозрачности водяного пара, были добавлены наблюдения эксперимента MAWD/Viking 1,2, полученные при перелёте к Марсу [Trokhimovskiy et al., 2015].

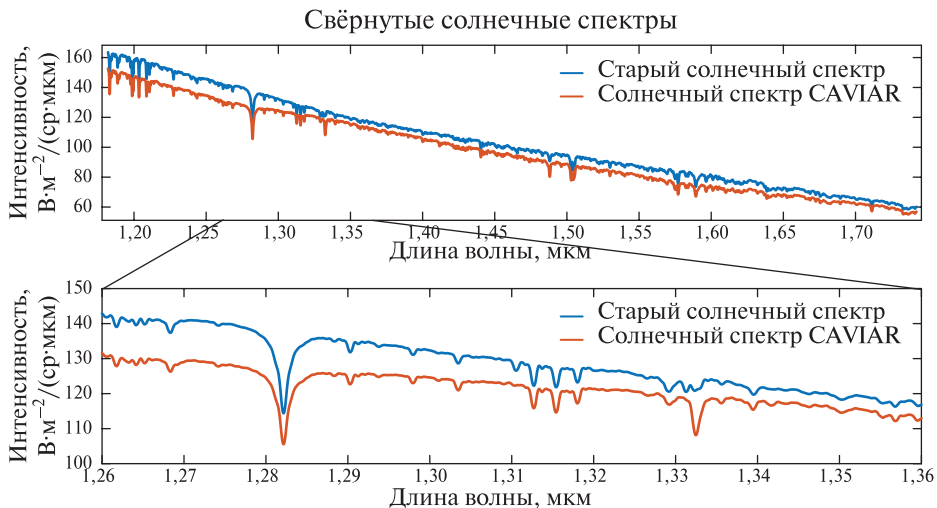


Рис. 3. Солнечные спектры MAWD + Fiorenza and Formisano и CAVIAR, свёрнутые с разрешением СПИКАМ

В этой работе мы использовали новый солнечный спектр CAVIAR [Menang et al., 2013], полученный с высоким разрешением при наблюдении под разными зенитными углами на наземных обсерваториях. Этот спектр в целом имеет ряд расхождений с использовавшимся ранее для обработки солнечным спектром. Расхождения хорошо видны при сравнении двух спектров, свёрнутых с аппаратной функцией СПИКАМ, в интересующем нас спектральном диапазоне (рис. 3, см. с. 64).

2.2. Моделирование спектра поглощения атмосферы

В случае плоско-параллельной атмосферы, мы можем получить спектр поглощения атмосферы Марса, используя закон Бугера – Ламберта – Бера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau(\lambda)},$$

где оптическая толщина атмосферы определяется выражением

$$\tau(\lambda) = \int_0^{\infty} \chi(\lambda, z) \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right) dz,$$

здесь z — высота над поверхностью; μ и μ_0 — косинусы угла наблюдения и солнечного зенитного угла соответственно, $\chi(\lambda, z)$ — коэффициент экстинкции или коэффициент полного ослабления, который при отсутствии рассеяния равен:

$$\chi(\lambda, z) = \kappa_{ab}^a(\lambda, z) + \kappa_{ab}^g(\lambda, z),$$

где κ_{ab}^a и κ_{ab}^g — коэффициенты аэрозольного и газового поглощения.

В нашем случае мы пренебрегаем аэрозольным поглощением. В свою очередь коэффициент газового поглощения будет равен

$$\kappa_{ab}^g(\lambda, z) = \sigma(\lambda, z)n(z),$$

где $n(z)$ — численная концентрация молекул в см⁻³, $\sigma(\lambda, z)$ — сечение поглощения молекулы в см². Сечение поглощения является функцией температуры и давления среды.

Таким образом, для получения сечения поглощения нам нужна информация о профилях температуры и давления на всём протяжении атмосферы, значимом для поглощения. Мы разбиваем атмосферу на несколько достаточно тонких слоёв, и подсчитываем спектр пропускания через каждый слой.

Для того чтобы узнать параметры атмосферы на каждом слое, используем MCD v5.3 (Mars climate database [Millour et al., 2015]) лаборатории LMD (Le Laboratoire de Météorologie Dynamique, France) в отличие от предыдущих работ, использовавших MCD v4.3. К преимуществам новой версии относится не только улучшение самой модели общей циркуляции Марса, как например, введение радиационно-активных облаков, но и адаптация пылевого цикла под конкретные марсианские годы наблюдения для марсианских лет 24–32 (1996–2014).

Для того чтобы рассчитать сечение поглощения, нужно знать список линий молекул в выбранном диапазоне спектра, который можно найти в разных спектроскопических базах данных. В диапазоне прибора в основном поглощают две молекулы: основная составляющая атмосферы CO_2 и водяной пар. В предыдущих работах, анализирующих данные СПИКАМ ИК, была использована база данных колебательно-вращательных переходов молекул HITRAN-2012 [Rothman et al., 2013]. В 2017 г. была опубликована новая версия HITRAN-2016 [Gordon et al., 2017], которую мы использовали в этой работе для расчётов сечения поглощения CO_2 . Для лоренцевского уширения важно, каким газом уширяется исследуемый газ; поскольку для молекул углекислого газа известны коэффициенты самоуширения, мы их можем использовать напрямую из HITRAN, так как атмосфера Марса на 96 % состоит из CO_2 . Для воды же традиционно используются лоренцевское уширение воздухом, умноженное на коэффициент 1,7 [Brown et al., 2007], в качестве источника информации для уширения воздухом обычно используется тот же HITRAN. Кроме него для воды ещё могут быть использованы спектроскопические базы GEISA [Jacquinet-Husson et al., 2016] и BT2 [Barber et al., 2006]. Проведено сравнение спектров сечения поглощения водяного пара, полученных с помощью баз данных BT2 и HITRAN-2016 с учётом коэффициентов 1,7. Как видно на рис. 4 (см. с. 67), BT2 имеет достаточно большие сдвиги центров линий, поэтому её было решено не использовать.

В настоящее время ведётся активная работа по проведению лабораторных и теоретических расчётов уширения отдельных линий воды в CO_2 среде для приложения исследования планет земной группы. Между тем в ближнем ИК-диапазоне работ почти нет, кроме [Lavrentieva et al., 2015], где были произведены теоретические расчёты для списка линий BT2. Специально для нашей работы расчёты были адаптированы для списка переходов молекул воды HITRAN-2016, таким образом, были получены лоренцевские уширения линий H_2O в углекислой атмосфере. На рис. 5 (см. с. 67) показано сравнение использование постоянного коэффициента с расчётами для разных переходов.

Чтобы окончательно получить сечение поглощения каждой линии, мы должны скомбинировать различные механизмы уширения в атмосфере. Первый механизм — это уширение Доплера, связанное с уширением при движении молекул (от наблюдателя и к нему) в зависимости от температуры, и преобладает оно в высоких слоях атмосферы. Нам важна полуширина этой линии [Тимофеев, Васильев, 2003]:

$$a_D = \frac{\theta}{c} \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}.$$

Второй механизм — это уширение Лоренца, связанное со столкновениями молекул, а значит зависящее от давления и температуры. Здесь нам тоже важна полуширина этой линии [Тимофеев, Васильев, 2003], которую чаще всего пересчитывают относительно уже известной для стандартного давления и температуры:

$$a_L = a_{L_0} \left(\frac{p}{p_0} \right) \sqrt{\frac{T_0}{T}}.$$

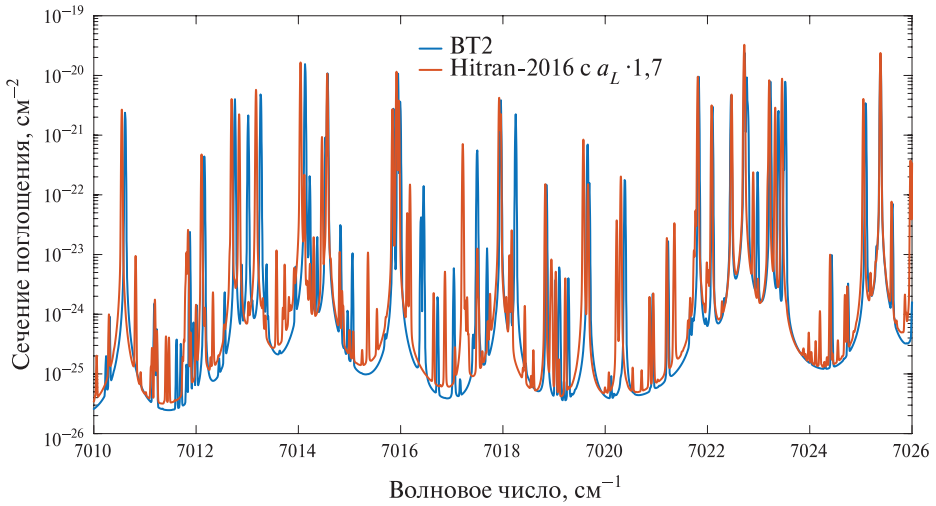


Рис. 4. Сравнение баз данных BT2 с Hitran-2016 с умноженными на 1,7 лоренцевскими полуширинами

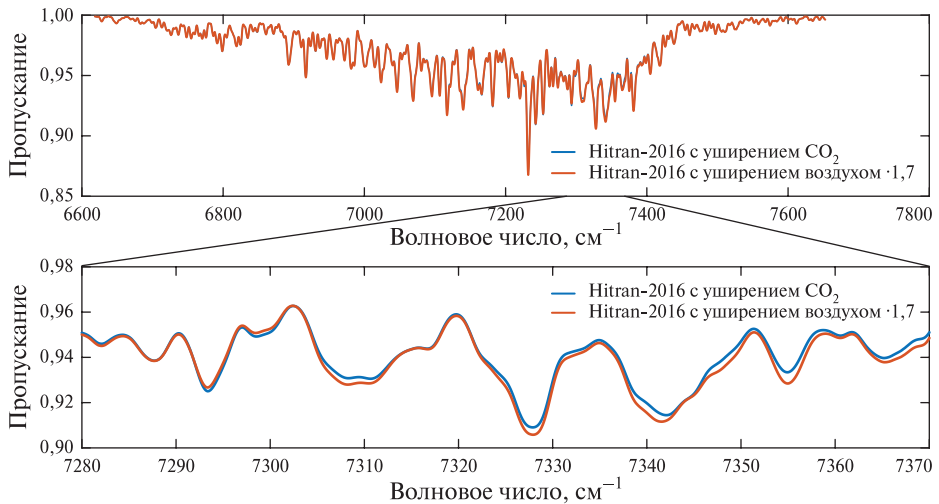


Рис. 5. Сравнение HITRAN-2016 с уширением воздухом и CO_2 , свёрнутое с аппаратной функцией СПИКАМ для типичных условий на поверхности

Однако окончательное уширение, которое видно на спектре, является свёрткой двух этих контуров и называется контуром Фойгта. Отдельное внимание в работе было посвящено сравнению разных методов расчёта этого контура. Контур Фойгта чаще всего считается численной аппроксимацией. Мы рассмотрели несколько аппроксимаций, но самыми удачными оказались [Abraog, Quine, 2012] и [Humlíček, 1982]. В силу того, что первый алгоритм хоть и точнее примерно на 0,3 % и даёт почти точное решение, но медленнее почти в два раза, мы используем второй алгоритм.

2.3. Корректировка инструментальных эффектов

Архив данных СПИКАМ ИК содержит данные, откалиброванные как в спектральных, так и в абсолютных энергетических единицах. Были обнаружены небольшие сдвиги спектральных калибровок вплоть до 0,4 нм в зависимости от длины волны, искажающие спектр (рис. 6). Как правило, они связаны с неточностями при температурной калибровке. Такие сдвиги были убраны, использовались солнечные линии, лежащие вне полос поглощения льда и атмосферы.

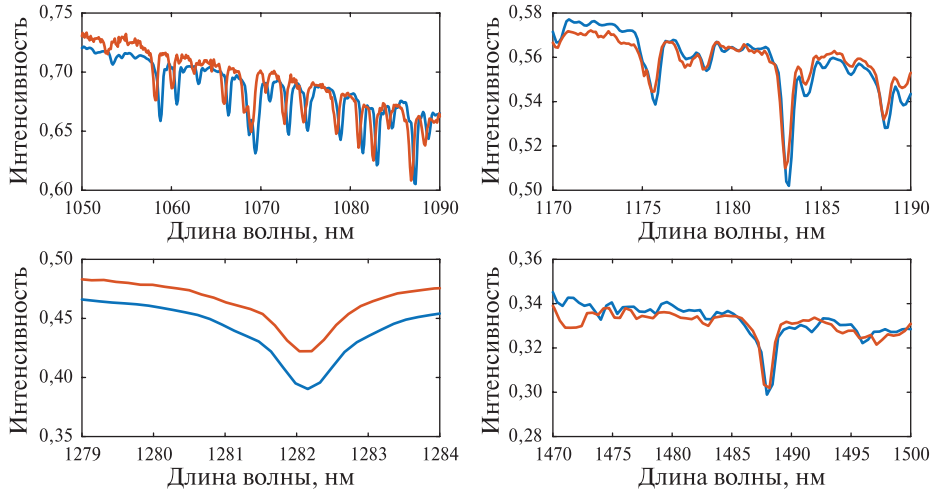


Рис. 6. Примеры сдвига в спектрах по сравнению с референтным солнечным спектром

3. СПЕКТР ЛЬДОВ И СРАВНЕНИЕ С ЛАБОРАТОРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Используя описанные выше методы расчёта спектров атмосферы, а также улучшенные спектральные калибровки прибора, получаем спектр коэффициента отражения льда поверхности с относительно высоким спектральным разрешением (рис. 7, синий цвет). Этот спектр получен на 6682 орбите при пролёте над южной полярной шапкой Марса. На этой орбите был записан полный спектр, а не отдельные окна, как описано в работе [Korablev et al., 2006]. Пики на 1,28 и 1,33 мкм связаны с неточностью референтного солнечного спектра. Также на спектре чётко видна широкая полоса поглощения водяного льда от 1,4 до 1,7 мкм в соответствии с [Langevin et al., 2007].

Оранжевым цветом на рис. 7 (см. с. 69) показан модельный спектр льда для определённого оптического пути согласно [Hansen, 2005]. Несогласование глубин некоторых линий можно объяснить насыщением спектральных линий в этом диапазоне, а недостижение нуля пропускания самых сильных полос поглощений — воздействием на спектр пыли и аэрозолей [Langevin et al., 2007] или неполным покрытием льда области поля зрения.

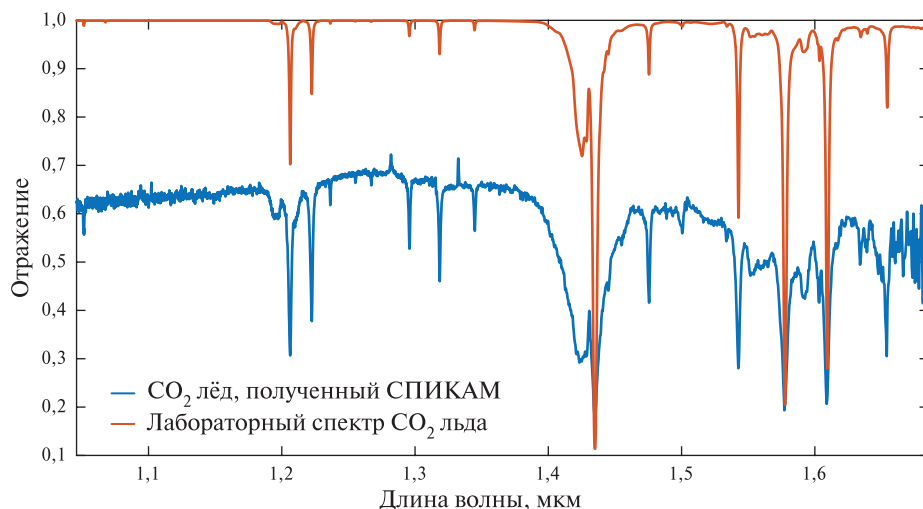


Рис. 7. Сравнение полученного спектра льда с лабораторными измерениями [Hansen, 2005]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку атмосфера Марса содержит большое количество пыли, особенно в период сублимации южной полярной шапки, планируется усовершенствовать моделирование спектра атмосферы с учётом многократного рассеяния света на аэрозолях, используя данные ПФС/МЕХ и THEMIS/Mars-Odyssey о распределении пыли.

Спектры высокого разрешения углекислого льда потенциально могут позволить исследовать вклад температуры, плотности упаковки и размера зёрен, формирующих лёд, по глубине линий и полос. Для исследования этих параметров планируется провести моделирование спектров поглощения льда, используя последние лабораторные измерения коэффициентов преломления льда, предоставленные Бернаром Шмиттом (B. Schmitt, Laboratoire de Planétologie de Grenoble, UJF/CNRS, Grenoble, France).

Поскольку СПИКАМ проводит наблюдения планеты непрерывно с 2004 г., массив данных может быть в дальнейшем использован для исследования пространственных и временных вариаций льда на сезонных и постоянных полярных шапках, а также для поиска и исследования конденсации CO_2 в низких широтах Марса [Piqueux et al., 2015].

Результаты получены при поддержке гранта 14.W03.31.0017.

ЛИТЕРАТУРА

[Тимофеев, Васильев, 2003] Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003.

- [Abrarov, Quine, 2011] *Abrarov S. M., Quine B. M.* Efficient algorithmic implementation of the Voigt/complex error function based on exponential series approximation // *Applied Mathematics and Computation*. 2011. V. 218. Iss. 5. P. 1894–1902. <http://doi.org/10.1016/j.amc.2011.06.072>.
- [Barber et al., 2006] *Barber R. J., Tennyson J., Harris G. J., Tolchenov R. N.* A high-accuracy computed water line list // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. V. 368. Iss. 3. P. 1087–1094. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10184.x>.
- [Bertaux et al., 2005] *Bertaux J.-L., Korablev O., Fonteyn D., Guibert S., Chassefière E., Lefèvre F., Dimarellis E., Dubois J. P., Hauchecorne A., Cabane M., Rannou P., Lvasseur-Regourd A. C., Cernogora G., Quémerais E., Hermans C., Kockarts G., Lippens C., De Mazziere M., Moreau D., Muller C., Neefs E., Simon P. C., Forget F., Hourdin F., Talagrand O., Moroz V. I., Rodin A., Sandel B., Stern A.* Global structure and composition of the martian atmosphere with SPICAM on Mars express // *Advances in Space Research*. 2005, V. 35. Iss. 1. P. 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.09.055>.
- [Brown et al., 2007] *Brown L. R., Humphrey C. M., Gamache R. R.* CO₂-broadened water in the pure rotation and ν₂ fundamental regions // *J. Molecular Spectroscopy*. 2007. V. 246. Iss. 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jms.2007.07.010>
- [Brown et al., 2010] *Brown A. J., Calvin W. M., McGuire P. C., Murchie S. L.* Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) south polar mapping: First Mars year of observations // *J. Geophys. Res.* V. 115. E00D13. doi: 10.1029/2009JE003333.
- [Fiorenza, Formisano, 2005] *Fiorenza C., Formisano V.* A solar spectrum for PFS data analysis, *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. Iss. 10. P. 1009–1016. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.12.008>.
- [Gordon et al., 2017] *Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C., Kochanov R. V., Tan Y., Bernath P. F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K. V., Drouin B. J., Flaud J.-M., Gamache R. R., Hodges J. T., Jacquemart D., Perevalov V. I., Perrin A., Shine K. P., Smith M.-A. H., Tennyson J., Toon G. C., Tran H., Tyuterev V. G., Barbe A., Császár A. G., Devi V. M., Furtenbacher T., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Jolly A., Johnson T. J., Karman T., Kleiner I., Kyuberis A. A., Loos J., Lyulin O. M., Massie S. T., Mikhailenko S. N., Moazzen-Ahmadi N., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Polyansky O. L., Rey M., Rotger M., Sharpe S. W., Sung K., Starikova E., Tashkun S. A., Vander Auwera J., Wagner G., Wilzewski J., Wcisło P., Yu S., Zak E. J.* The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017. V. 203. P. 3–69. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.06.038>.
- [Hansen, 2005] *Hansen N.* Ultraviolet to near-infrared absorption spectrum of carbon dioxide ice from 0.174 to 1.8 μm // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Iss. E11003. doi: 10.1029/2005JE002531.
- [Hourdin et al., 1993] *Hourdin F., Forget F., Talagrand O.* The Annual Pressure Cycle on Mars: Results from the LMD Martian Atmospheric General Circulation Model // *Workshop on Atmospheric Transport on Mars* / ed. J. R. Barnes, R. M. Haberle. Corvallis, Oregon, June 28–30 1993. 1993. P. 16–17.
- [Humlíček, 1982] *Humlíček J.* Optimized Computation of the Voigt and Complex Probability Functions // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1982. V. 27. P. 437–444. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(82\)90078-4](https://doi.org/10.1016/0022-4073(82)90078-4).
- [Jacquinot-Husson et al., 2016] *Jacquinot-Husson N., Armante R., Scott N. A., Chédin A., Crépeau L., Boutammine C., Bouhdaoui A., Crevoisier C., Capelle V., Boonne C., Poulet-Crovisier N., Barbe A., Chris Benner D., Boudon V., Brown L. R., Buldyreva J., Campargue A., Coudert L. H., Devi V. M., Down M. J., Drouin B. J., Fayt A., Fittschen C., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hill C., Hodnebrog Ø., Hu S.-M., Jacquemart D., Jolly A., Jiménez E., Lavrentieva N. N., Liu A.-W., Lodi L., Lyulin O. M., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A., Nielsen C. J., Orphal J., Perevalov V. I., Perrin A., Polovtseva E., Predoi-Cross A., Rotger M., Ruth A. A., Yu S. S., Sung K., Tashkun S. A., Tennyson J., Tyuterev V. G., Vander Auwera J., Voronin B. A., Makie A.* The 2015

- edition of the GEISA spectroscopic database // *J. Molecular Spectroscopy*. 2016. V. 327. P. 31–72. <https://doi.org/10.1016/j.jms.2016.06.007>.
- [Kahre, Haberle, 2010] *Kahre M. A., Haberle R. M.* Mars CO₂ cycle: Effects of airborne dust and polar cap ice emissivity // *Icarus*. 2010. V. 207. Iss. 2. P. 648–653. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.12.016>.
- [Korablev et al., 2006] *Korablev O., Bertaux J.-L., Fedorova A.* et al. SPICAM IR acousto-optic spectrometer experiment on Mars Express // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. E09S03. doi: 10.1029/2006JE002696.
- [Langevin et al., 2007] *Langevin Y., Bibring J.-P., Montmessin F., Forget F., Vincendon M., Dou  t   S., Poulet F., Gondet B.* Observations of the south seasonal cap of Mars during recession in 2004–2006 by the OMEGA visible/near-infrared imaging spectrometer on board Mars Express // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. E08S12. doi: 10.1029/2006JE002841.
- [Lavrentieva et al., 2015] *Lavrentieva N. N., Voronin B. A., Fedorova A. A.* H₂¹⁶O line list for the study of atmospheres of Venus and Mars // *Opt. Spectrosc.* 2015. V. 118. Iss. 11. <https://doi.org/10.1134/S0030400X15010178>.
- [Menang et al., 2013] *Menang K. P., Ptashnik I. V., Coleman M. D., Gardiner T. D., Shine K. P.* A high-resolution near-infrared extraterrestrial solar spectrum derived from ground-based Fourier transform spectrometer measurements // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 5319–5331. doi: 10.1002/jgrd.50425.
- [Millour et al., 2015] *Millour E., Forget F., Spiga A.* et al. The Mars Climate Database (MCD version 5.2) // *European Planetary Science Congress*. 2015. V. 10. EPSC2015-438.
- [Paige, Wood, 1992] *Paige D. A., Wood S. E.* Modeling the Martian seasonal CO₂ cycle 2. Interannual variability // *Icarus*. 1992. V. 99. Iss. 1. P. 15–27. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90167-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(92)90167-6).
- [Piqueux et al., 2015] *Piqueux S., Kleinb  hl A., Hayne P. O., Kass D. M., Schofield J. T., McClesse D. J.* Variability of the martian seasonal CO₂ cap extent over eight Mars Years // *Icarus*. 2015. V. 251. P. 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.045>.
- [Rothman et al., 2013] *Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Benner D. C., Bernath P. F., Birk M., Bizzacchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., M  ller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. G., Wagner G.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2013. V. 130. P. 4–50.
- [Trokhimovskiy et al., 2015] *Trokhimovskiy A., Fedorova A., Korablev O., Montmessin F., Bertaux J.-L., Rodin A., Smith M. D.* Mars’ water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five Martian years of observations // *Icarus*. 2015. V. 251. P. 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.007>.

HIGH RESOLUTION SPECTRA OF CO₂ ICE BASED ON SPICAM/MARS EXPRESS OBSERVATIONS: COMPARISON WITH LABORATORY MEASUREMENTS

A. Lomakin^{1,2}, A. A. Fedorova¹, O. I. Korablev¹, F. Montmessin³, B. A. Voronin⁴

¹ Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (iki ran), Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (State University) (MIPT), Dolgoprudniy, Russia

³ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations spatiales Centre National de la Recherche Scientifique (LATMOS CNRS), France

⁴ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Russian Academy of Sciences, Siberian Branch (IAO SB RAS), Tomsk, Russia

Aim of this work is to obtain high resolution reflectance spectra of CO₂ ice based on SPICAM/MEX observations. For these purposes we developed algorithm for correcting spectra of Mars obtained in spectral range of 1–1.7 μm from atmospheric gaseous absorption features using the latest version of spectroscopic database HITRAN for CO₂ and H₂O molecules and a global circulation model of Mars MCD v5.3. Obtained spectra of ice are now being compared to existing laboratory measurements. Results of this work will be used for studying seasonal and interannual variations of the CO₂ ice abundance on surface of Mars.

Keywords: spectroscopy, Mars, CO₂ ice, reflectance

Lomakin Alexander Alexandrovich — senior laborant, bachelor, aleksander.lomakin96@gmail.com

Fedorova Anna Alexandrovna — chief researcher, PhD, fedorova@iki.rssi.ru

Korablev Oleg Igorevich — head of planetary physics department, PhD, korab@iki.rssi.ru

Montmessin Franck, researcher, PhD, Franck.Montmessin@latmos.ipsl.fr

Voronin Boris Alexandrovich — senior researcher, PhD, vba@iao.ru

МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ ПО СХЕМЕ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ СПУТНИК – СПУТНИК

П. Н. Николаев

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва (Самарский университет)

В данной работе предлагается метод томографии электронной концентрации в ионосфере, разработанный на основе алгоритма свёртки, применяемый к данным, полученным по схеме регистрации спутник – спутник. Использование данного метода позволит осуществлять первичную оценку электронной концентрации в ионосфере на борту спутника, сокращая количество информации, передаваемой на Землю, что невозможно с использованием алгебраических методов реконструкции. Предлагаемый метод состоит из двух этапов: на первом доопределяются недостающие отсчёты в проекциях с использованием априорной информации о виде радоновского образа проекции и площади проекции; на втором этапе используется алгоритм свёртки.

Ключевые слова: томография ионосферы, спутниковый мониторинг, алгоритм свёртки

ВВЕДЕНИЕ

Состояние ионосферы существенно зависит от гелио- и геомагнитной активности, кроме того ионосфера способна «отражать» геофизические события, так, в работе [Пулинец и др., 2014], описывается связь изменений в ионосфере с землетрясениями. Поскольку параметры ионосферы меняются с течением времени, существует потребность в оперативном мониторинге ионосферы, позволяющем получать информацию о её состоянии в реальном времени.

В настоящее время с развитием навигационных спутниковых систем стало возможным осуществлять дистанционное зондирование ионосферы в широком диапазоне различных позиций приёмопередающих систем и производить реконструкцию её структуры на основе методов компьютерной томографии.

Непрерывно получать информацию о профиле электронной концентрации в ионосфере позволяет схема регистрации сигналов, предложенная в работе [Романов и др., 2009], которая использует приёмные и передающие устройства на спутниках группировки. Тем не менее, при применении данной схемы регистрации сигналов, в проекциях (в томографическом смысле) лежит недостаточное количество отсчётов для использования методов томографии, основанных на обратном преобразовании Радона, и задача является малоракурсной с большой степенью некорректности. Точность решения задачи томографии при использовании традиционных алгебраических методов реконструкции [Куницын и др., 2007; Романов и др., 2009] зависит от сложности аппроксимации проекционного оператора в системе линейных уравнений, при увеличении которой время решения системы линейных уравнений возрастает. Кроме того, точность решения задачи сильно зависит от начального приближения в алгоритме реконструкции.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Реконструкция изображения по проекциям — есть процесс получения изображения двухмерного распределения по оценкам его линейных интегралов вдоль конечного числа линий с известным положением [Herman, 2009]. В случае электронной концентрации ионосферы, такой интегральной характеристикой является полное электронное содержание (ПЭС), которое представляет собой интеграл электронной концентрации по пути распространения электромагнитной волны и выражается в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$).

В задачах томографии линейный интеграл от $f(x, y)$ соответствует радоновскому образу

$$\tilde{R}f(x, y) = p(l, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - l) dx dy. \quad (1)$$

Функция $\tilde{R}f$ полностью определена её значениями в точках (l, θ) с областью задания $-E < l < E$ и $0 \leq \theta \leq \pi$, где E — верхняя граница диапазона реконструкции. Другими словами оператор \tilde{R} ставит в соответствие функции f в пространстве (x, y) функцию $\tilde{R}f$ в пространстве (l, θ) . Одна точка в (l, θ) соответствует некоторой прямой L (находящейся на расстоянии l от начала координат и образующий угол θ с положительным направлением оси x) в пространстве (x, y) , так как $\tilde{R}f(x, y)$ является интегралом от f вдоль L . Обратное же преобразование Радона

$$f(r, \varphi) = \tilde{R}^{-1} p(l, \theta) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\pi} \int_{-E}^E \frac{1}{r \cos(\theta - \varphi) - l} \cdot \frac{\partial p(l, \theta)}{\partial l} dl d\theta \quad (2)$$

предполагает, что известно точное значение $p(l, \theta)$ для всех l и θ , и что требуемые операции можно выполнить точно.

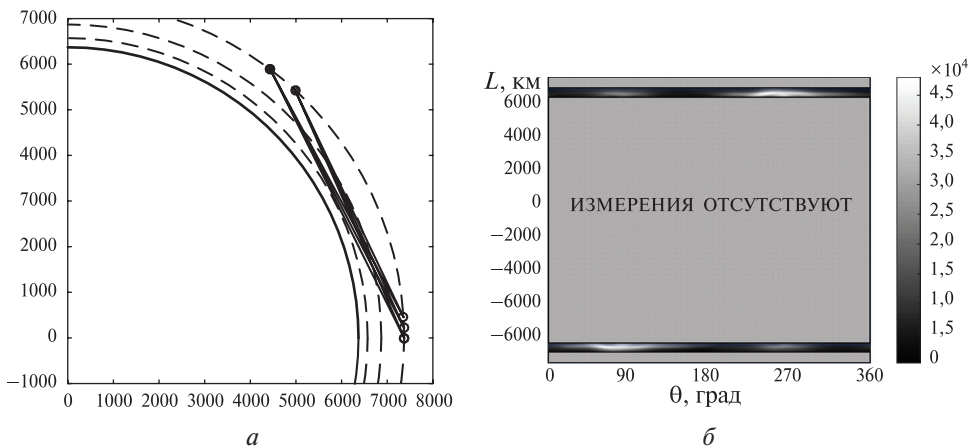


Рис. 1. Расположение радиотрасс для кластера, состоящего из 5 спутников (а); Область определения функции $\tilde{R}f$ (серым цветом показана область где измерения отсутствуют) (б)

Для регистрации данных ПЭС на трассах спутник – спутник в данной работе рассматривается кластер спутников, геометрия которого предложена авторами работы [Романов и др., 2011]. Высота орбиты спутников кластера составляет $h_{orb} = 1000$ км. Это обеспечивает покрытие диапазона реконструкции $H \in [200; 500]$ км, выбор которого обусловлен тем, что слой максимальной концентрации в подавляющем большинстве случаев лежит в границах этого диапазона. Выбор количества спутников в кластере зависит от требуемого высотного разрешения реконструкции, например, для решения томографической задачи в диапазоне H с разрешением $\Delta h = 50$ км потребуется 5 спутников: 3 спутника с передатчиками и 2 с приёмниками, что обеспечит покрытие диапазона с шагом Δh (рис. 1а).

Таким образом реконструкция по проекциям будет производиться на кольцевом носителе в диапазоне H . Выше и ниже этого диапазона реконструкция проводится не будет. Другими словами координата l определена в диапазонах $-E_{top} < l < -E_{down}$ и $E_{down} < l < E_{top}$, где $E_{down} = R_{earth} + 200$ км, $E_{top} = R_{earth} + 500$ км, R_{earth} – средний радиус Земли. Соответственно возникает вопрос о доопределении недостающих отсчётов в $p(l, \theta)$ во всей требуемой области задания l : $-E < l < E$, где $E = R_{earth} + h_{orb}$ (рис. 1б).

2. АЛГОРИТМ ДООПРЕДЕЛЕНИЯ НЕДОСТАЮЩИХ ПРОЕКЦИОННЫХ ДАННЫХ

Радоновский образ $p(l, \theta)$, вычисленный для фиксированного угла θ , в литературе называется плоскопараллельной проекцией [Негман, 2009]. Следует отметить

важное свойство проекции такого вида: $\int_{-E}^E p(l, \theta) dl = \text{const}, \forall \theta$. То есть, в случае параллельного проецирования сумма линейных интегралов в проекции постоянна независимо от угла зондирования θ . Назовём эту сумму

$S = \int_{-E}^E p(l, \theta) dl$. Данная величина является входным параметром алгоритма доопределения недостающих проекционных данных и должна быть определена априорно.

Рассмотрим алгоритм доопределения недостающих проекционных данных. На рис. 2 приведён схематичный вид плоскопараллельной проекции $p(l, \theta)$. На вход алгоритма подаются измерения ПЭС, определённые на участках BC и DE ($p_{2,4}(l, \theta)$) и общая площадь под кривой на промежутке AF :

$S = \sum_{i=1}^5 S_i$. Задача алгоритма — доопределить $p(l, \theta)$ на интервалах AB, CD, EF .

Алгоритм доопределения недостающих проекционных данных состоит из следующих шагов:

1. Моделирование начального приближения в полярной системе координат

$$Ne(h, \varphi) = Nm(\varphi) \cdot \exp \left[1 - \frac{h - h_0}{\sigma} - \exp \left(- \frac{h - h_0}{\sigma} \right) \right], \quad (3)$$

где $Nm(\varphi) = F^{-1} \left\{ \frac{F(i(\varphi))}{F(k(\varphi))} \right\}$ — широтный профиль электронной концентрации; h_0 — референсная высота максимума ионизации; σ — параметр масштаба; $k(\varphi)$ — ядро свёртки; $i(\varphi)$ — измерения, получаемые с радиотрасс, проходящих близ нижней границы диапазона высот H . Ядро $k(\varphi)$ (рис. 3) удовлетворяет выражению $i(\varphi) = (Nm * k)(\varphi)$.

2. Перевод начального приближения из полярной в декартову систему координат $Ne(h, \varphi) \rightarrow Ne(x, y)$.

3. Вычисление радоновского образа $p_{apr}(l, \theta) = \tilde{R}(Ne(x, y))$, который для фиксированных значений θ будем называть априорными функциями проекций.

4. Доопределение $p(l, \theta)$ на промежутке $AB \forall \theta$: $p(l, \theta)$ на промежутке AB описывается полиномом второй степени $p_1(l) = a \cdot l^2 + b \cdot l + c$, для нахождения коэффициентов которого решается система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 2a \cdot l_A + b = \dot{p}_{apr_A}, \\ a \cdot l_A^2 + b \cdot l_A + c = p_{apr_A}, \\ a \cdot l_B^2 + b \cdot l_B + c = p_B, \end{cases} \quad (4)$$

где p_{apr_A} — значение априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ в точке A ; p_B — измерение $p_{2,4}(l, \theta)$ в точке B ; \dot{p}_{apr_A} — производная априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ по l в точке A .

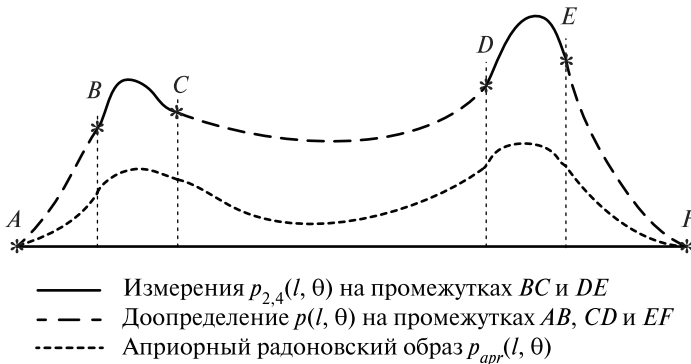


Рис. 2. Схематичный вид плоскопараллельной проекции $p(l, \theta)$

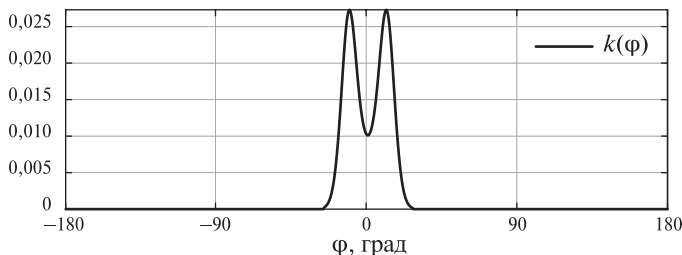


Рис. 3. Вид ядра свёртки $k(\varphi)$

5. Доопределение $p(l, \theta)$ на промежутке $EF \forall \theta$: $p(l, \theta)$ на промежутке EF описывается полиномом второй степени $p_5(l) = a \cdot l^2 + b \cdot l + c$, для нахождения коэффициентов которого решается система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 2a \cdot l_F + b = \dot{p}_{apr_F}, \\ a \cdot l_E^2 + b \cdot l_E + c = p_{apr_E}, \\ a \cdot l_E^2 + b \cdot l_E + c = p_E, \end{cases} \quad (5)$$

где p_{apr_E} — значение априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ в точке E ; p_E — измерение $p_{2,4}(l, \theta)$ в точке E ; \dot{p}_{apr_F} — производная априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ по l в точке F .

6. Вычисление площади криволинейной трапеции ограниченной графиком функции на промежутке $CD \forall \theta$:

$$S_3 = S - \int_A^B p_1(l) dl - \int_E^F p_5(l) dl - \int_B^C p_{2,4}(l) dl - \int_D^E p_{2,4}(l) dl.$$

7. Доопределение $p(l, \theta)$ на промежутке $CD \forall \theta$: $p(l, \theta)$ на промежутке CD описывается функцией $p_3(l) = p_{apr}(l) \cdot (a \cdot l^2 + b \cdot l + c)$, для нахождения коэффициентов a, b, c которой решается система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a \sum p_{apr_i} l_i^2 + b \sum p_{apr_i} l_i + c \sum p_{apr_i} = \frac{S_3}{h} - \frac{1}{2}(p_C + p_D), \\ p_{apr_C} (a \cdot l_C^2 + b \cdot l_C + c) = p_C, \\ p_{apr_D} (a \cdot l_D^2 + b \cdot l_D + c) = p_D, \end{cases} \quad (6)$$

где p_C — измерение $p_{2,4}(l, \theta)$ в точке C ; p_D — измерение $p_{2,4}(l, \theta)$ в точке D ; p_{apr_C} — значение априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ в точке C ; p_{apr_D} — значение априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ в точке D ; l_i — номер отсчёта в пределах промежутка $CD \forall i \in [2, N-1]$; p_{apr_i} — значение априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ в точке l_i ; $l_C = l_1$ — номер отсчёта в точке C ; $l_D = l_N$ — номер отсчёта в точке D .

В результате работы данного алгоритма доопределяется радоновский образ $p(l, \theta)$ во всей требуемой области задания $l: -E < l < E$. На следующем шаге возможно осуществлять реконструкцию искомой функции $f^*(x, y)$ широким спектром методов реконструкции.

3. ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ

Обратное преобразование Радона \mathcal{R}^{-1} может быть записано, как последовательность операторов вычисления частной производной \mathcal{D}_l , оператора Гилберта \mathcal{H}_l и оператора обратного проецирования \mathcal{B} [Herman, 2009]:

$$\mathcal{R}^{-1} = -\frac{1}{2\pi} \mathcal{B} \mathcal{H}_l \mathcal{D}_l. \quad (7)$$

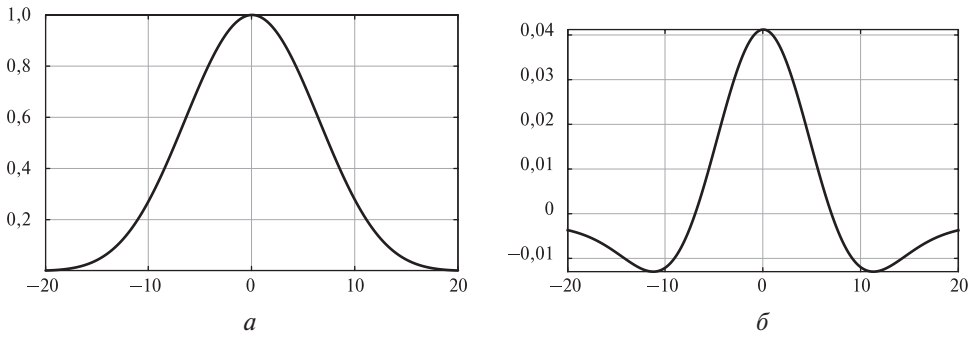


Рис. 4. Окно Натолла $W(\omega)$ (а); ядро свёртки $w(l)$ (б)

Для решения задачи томографии в данной работе предлагается использовать свёрточный алгоритм реконструкции [Bracewell, Riddle, 1975; Herman, 2009], который заключается в замене операций вычисления частной производной и преобразования Гилберта одной операцией свёртки:

$$f^*(x, y) = \mathcal{B}(p_\theta * w)(l). \quad (8)$$

При использовании данного алгоритма функцию ядра $w(l)$ выбирают исходя из выражения:

$$w(l) = 2 \int_0^{\omega_0/2} \omega \cdot W(\omega) \cdot \cos(2\pi\omega l) d\omega, \quad (9)$$

где $W(\omega)$ — функция окна с шириной полосы пропускания ω_0 . Здесь можно использовать окно Натолла (рис. 4а):

$$W(\omega) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi\omega}{\omega_0}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi\omega}{\omega_0}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi\omega}{\omega_0}\right), \quad (10)$$

где $a_0 = 0,355768$, $a_1 = 0,487396$, $a_2 = 0,144232$, $a_3 = 0,012604$. Данное окно хорошо работает с зашумленными измерениями, но при этом теряет в разрешающей способности за счёт широкого главного лепестка спектра.

Ядро свёртки, полученное из окна Натолла, представлено в работе [Филонин, Николаев, 2015] следующим выражением:

$$w(l) = a_0 \left[\frac{1}{2} \operatorname{sinc}(\pi l / \omega_0) - \frac{1}{4} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi l \omega_0}{2}\right) \right] + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^3 a_k \left[\operatorname{sinc}(\pi l \omega_0 + k\pi) - \frac{1}{2} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi l \omega_0 + k\pi}{2}\right) + \operatorname{sinc}(\pi l \omega_0 - k\pi) - \frac{1}{2} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi l \omega_0 - k\pi}{2}\right) \right]. \quad (11)$$

Вид ядра свёртки $w(l)$ представлен на рис. 4б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен томографический алгоритм реконструкции электронной концентрации в плоскости орбиты кластера спутников. Использование данного метода позволит осуществлять первичную оценку электронной концентрации в ионосфере на борту спутника, сокращая количество информации, передаваемой на Землю, что невозможно с использованием алгебраических методов реконструкции. Показаны два этапа алгоритма реконструкции: на первом определяются недостающие отсчеты в проекциях с использованием априорной информации о виде радоновского образа проекции и площади проекции; на втором этапе используется алгоритм свертки. Исследование функционирования данного метода позволит сформировать требования к бортовым системам спутников группировки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20215).

ЛИТЕРАТУРА

- [Куницын и др., 2007] *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 316 с.
- [Пулинец и др., 2014] *Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Дудкин С. А., Цадиковский Е. И.* Прогноз землетрясений возможен?!. М.: Тривиант, 2014. 144 с.
- [Романов и др., 2009] *Романов А. А., Трусов С. В., Новиков А. В., Аджалова А. В., Романов А. А., Селин В. А.* Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИСЗ на основе анализа характеристик когерентного излучения // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М.: НПП ВНИИЭМ, 2009. Т. 111. С. 37–42.
- [Романов и др., 2011] *Романов А. А., Романов А. А., Урличич Ю. М.* Томографическое исследование ионосферы Земли с использованием кластеров малоразмерных космических аппаратов // Тр. Междунар. науч. конф. MEDIAS'2011. М.: ИФТИ, 2011. С. 47–57.
- [Филонин, Николаев, 2015] *Филонин О. В., Николаев П. Н.* Мониторинг полного электронного содержания ионосферы спутниковыми группировками на основе радиотомографических методов // 17-я Конф. молодых ученых «Навигация и управление движением»: сб. тр. 2015. С. 374–381.
- [Bracewell, Riddle, 1975] *Bracewell R. N., Riddle A. C.* Inversion of fanbeam scans in radio astronomy // *Astrophys. J.* 1975. V. 150. P. 427–434.
- [Herman, 2009] *Herman G. T.* Fundamentals of Computerized Tomography. Image Reconstruction from Projections. Springer-Verlag London Limited, 2009. 297 p.

METHOD FOR RECONSTRUCTION IONOSPHERIC ELECTRON DENSITY UNDER INTER-SATELLITE DATA REGISTRATION SCHEME

P. N. Nikolaev

Samara National Research University (Samara University)

In this paper, we propose a method of ionospheric electron concentration tomography, developed on the convolution algorithm basis, applied to data obtained from the inter-satellite registration scheme. The use of this method will allow the primary estimation of ionospheric electron concentration on satellite board, reducing the amount of information transmitted to the ground station, which is impossible with the use of algebraic reconstruction methods. The proposed method consists of two stages: at the first stage, the missing counts in projections are determined with the use of a priori information about Radon image of the projection and the projection square; the second stage uses the convolution algorithm.

Keywords: ionospheric tomography, satellite monitoring, convolution algorithm

Nikolaev Petr Nikolaevich — post-graduate student, e-mail: pnikolayev@gmail.com

РАСЧЁТ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА

*И. Русских¹, А. Шиховцев¹, С. Чупраков¹, А. Киселев¹, В. Томин¹,
В. Скоморовский¹, П. Ковадло¹, В. Лукин², Д. Колобов¹*

¹ Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН)

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения
Российской академии наук (ИОА СО РАН)

Исследование тонкой структуры солнечной атмосферы является одной из важнейших экспериментальных задач современной физики Солнца. Разрешающая способность солнечных телескопов наземного базирования — основных инструментов, предназначенных для получения информации о структуре солнечных образований — ограничена атмосферной турбулентностью. В идеальном случае для достижения дифракционной формы функции размытия точки волновой фронт на входной апертуре телескопа должен формироваться лучами с равной оптической длиной пути. В атмосфере Земли за счёт турбулентного перемешивания воздуха с разной температурой и, соответственно, разными плотностью и показателем преломления возникает оптическая разность хода и, как следствие, формируются искажения волнового фронта. При характерных атмосферных условиях можно ожидать, что разрешающая способность телескопа составит 1,5–2", в то же время размер тонкоструктурных образований в солнечной атмосфере составляет величину порядка 0,1". Для наблюдений солнечных образований с таким разрешением в режиме реального времени исправление волнового фронта осуществляется с помощью систем адаптивной оптики, в которых для измерения оптических искажений используются датчики типа Шака-Гартмана, а для их коррекции — деформируемые и тип-тилт зеркала, сопряжённые с плоскостью апертуры телескопа. В работе обсуждаются результаты исследований адаптивной оптики и атмосферы, выполненных для солнечных телескопов ИСЗФ СО РАН. В частности расчёт многозеркальной системы адаптивной оптики для Большого солнечного вакуумного телескопа основан на решении ряда научных задач, включая определение пространственных масштабов турбулентной атмосферы Земли и масштабов оптической системы в сопряжённых плоскостях. На основе моделирования определены параметры оптической системы для согласования адаптивной оптики и оптики телескопа.

Ключевые слова: телескоп, адаптивная оптика

Русских Иван Викторович — ведущий инженер-программист, vanekrus@iszf.irk.ru

Шиховцев Артём Юрьевич — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Ashikhovtsev@iszf.irk.ru

Чупраков Сергей Александрович — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, chupr@iszf.irk.ru

Киселев Александр Викторович — младший научный сотрудник, kiselev@iszf.irk.ru

Томин Виталий Евгеньевич — младший научный сотрудник, tomin@iszf.irk.ru

Скоморовский Валерий Иосифович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, skoal@iszf.irk.ru

Ковадло Павел Гаврилович — старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, kovadlo@iszf.irk.ru

Лукин Владимир Петрович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, lukin@iao.ru

Колобов Дмитрий Юрьевич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, kolobov@iszf.irk.ru

ВВЕДЕНИЕ

Для решения актуальных задач физики Солнца нужны наблюдения с высоким пространственным разрешением. Такой задачей, например, является вопрос о механизмах переноса энергии во внешние слои атмосферы Солнца. Одним из возможных механизмов считается пересоединение магнитных силовых линий. Другая возможность заключается в распространении волн в солнечной плазме. Для решения задач сейсмологии атмосферы Солнца при этом важны наблюдения одновременно в нескольких спектральных линиях от короны до фотосферы. Например, источниками колебаний в верхних слоях атмосферы по некоторым исследованиям могут быть яркие точки в тени пятен в фотосфере [Jess et al., 2012]. Их характерный размер порядка 0.1 угловой секунды, тогда как размеры самих пятен порядка 2 угловых минут. Наиболее информативные наблюдения таких объектов получают с помощью наземных телескопов. Они позволяют проводить измерения в различных спектральных линиях, измерять скорость Доплера, магнитное поле, а также другие характеристики. Важно иметь сравнительно высокое временное разрешение, достаточное для исследований процессов в фотосфере и хромосфере с характерным временем порядка 5 с. Достижение этих характеристик в эксперименте — сложная задача. В полной мере достичь одновременно высокого временного и пространственного разрешения при многоволновых наблюдениях станет возможным с помощью крупных солнечных телескопов. Тем не менее, существующие телескопы меньшего диаметра имеют потенциал для развития, особенно в части достижения предельного пространственного разрешения. Разрабатываемые системы являются экспериментальной базой для создания новых крупных телескопов.

ОПИСАНИЕ ТЕЛЕСКОПА

Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ) — телескоп средней апертуры, расположен в Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) в посёлке Листвянка на берегу Байкала на высоте более 600 м над уровнем моря [Степанов и др., 1979]. Его основные характеристики перечислены ниже:

Месторасположение.	Байкальская астрофизическая обсерватория (о. Байкал)
Высота над уровнем моря	>600 м
Высота башни	25 м
Диаметр зеркала сидеростата	1 м
Диаметр главного объектива.	0,72 м
Фокусное расстояние.	40 м
Диаметр изображения Солнца	380 мм
Пространственное разрешение	0,2"
Пространственное разрешение в условиях атмосферы	1–2"
Остаточное давление в трубе	<5 кПа

Входная апертура телескопа расположена на башне высотой 25 м, что позволяет уменьшить влияние приземных турбулентных потоков воздуха. Свет

от неё попадает на объектив телескопа, расположенный в вакуумной трубе длиной 40 метров для уменьшения влияния воздушных потоков внутри телескопа на качество изображения. Остаточное давление в трубе менее 5 кПа минимизирует влияние воздушных потоков внутри неё. На выходе из трубы имеется три иллюминатора: через них свет поступает на координатное устройство, в оптическую лабораторию, где установлен опытный образец АОС, и в канал целевого спектрографа.

В 2000-х гг. был разработан стенд адаптивных оптических систем (АОС) «Ангара» для БСВТ, где была опробована схема работы датчика Шака-Гартманна и управления адаптивным зеркалом [Лукин и др., 1999]. В данной работе решается задача создания рабочей системы для рутинных наблюдений. Важным является обеспечить возможность проведения исследований с целью разработки методов анализа и управления АОС.

РАСЧЁТ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Влияние атмосферы можно пояснить следующим образом. Рассмотрим звезду, как источник света, настолько удалённый, что его можно считать точечным, а волновой фронт, приходящий от него на апертуру телескопа, плоским. В реальности между звездой и апертурой телескопа есть турбулентная среда — атмосфера Земли. Она имеет высотную стратификацию: разные скорости ветра и температуры воздуха, и соответственно плотности приводят к локальным изменениям показателя преломления, вследствие чего меняется оптическая разность хода, и форма волнового фронта перестаёт быть плоской. Это приводит к отклонению изображения точечного источника от дифракционного: оно размывается и мерцает.

Влияние атмосферы на разрешение телескопа оценивают по параметру r_0 — радиусу когерентности, который определяет средний размер участка поверхности волнового фронта, на котором разность фаз не превышает 1 радиан. В простом представлении разрешение крупноапертурного телескопа без АОС эквивалентно разрешению атмосферной «линзы» диаметром r_0 , следовательно, при r_0 около 13 см и длине волны около 500 нм можно надеяться на разрешение порядка 1". Характерные значения r_0 дневной атмосферы в БАО изменяются от 4 до 8 см.

Хорошее качество изображения наблюдается примерно в 10 процентах случаев. Как видно из таблицы на рис. 1, периоды хорошего качества продолжительностью 30–60 мин наблюдаются ещё реже. В эти периоды телескоп можно использовать в режиме высокого разрешения для получения длительных серий наблюдательных данных. В остальное время разрешение порядка 1–2", и тогда маловероятно достижение дифракционного качества даже с адаптивной оптикой, что ограничивает круг экспериментальных задач. Однако, в этом случае применение АОС может существенно увеличить эффективность телескопа в режиме среднего разрешения (не хуже 1"). Именно такое разрешение требуется для решения очень многих экспериментальных задач, например для проведения многоволновых наблюдений, которые дают разрешение по высоте в солнечной атмосфере.

	Hanle	BAO	Merak	Big Bear	Haleakala
Годовое количество часов $r_0 > 7$ см	514	790	731	1053	997
Годовое количество часов $r_0 > 12$ см	74	122	108	136	399
Годовое количество двухчасовых периодов с $r_0 > 7$ см	38	>40	76	83	82
Годовое количество двухчасовых периодов с $r_0 > 12$ см	1	>2	6	1	10

Рис. 1. Характерные значения r_0 для некоторых обсерваторий. Для БАО приведены оценки, сделанные ИСЗФ СО РАН, по данным измерений дрожания солнечных изображений с помощью датчика Брандта и локальных наклонов датчиком Шака-Гартмана с общей продолжительностью наблюдений около 2 лет

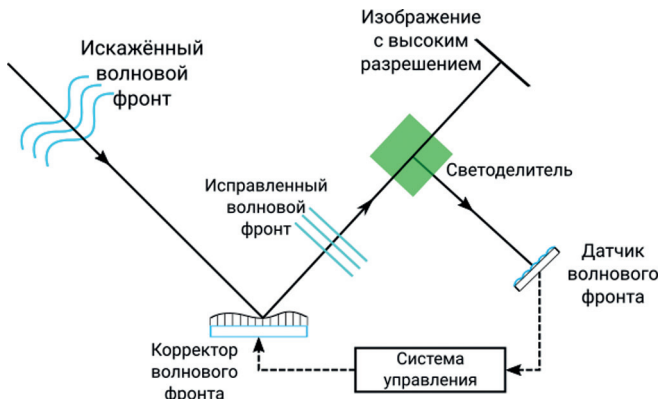


Рис. 2. Схема типичной классической АОС

Типичная «классическая» система адаптивной оптики, изображённая на рис. 2, состоит из датчика волнового фронта (ДВФ), корректора и контура управления. Искажённый волновой фронт падает на апертуру телескопа. Для измерения и коррекции искажений на уровне апертуры датчик и корректор располагаются в сопряжённой плоскости. Связь между корректором и ДВФ осуществляется посредством некоторого управляющего устройства — компьютера в общем случае. Процесс коррекции изображения может быть организован двумя способами: в виде замкнутого и открытого контура управления [Porter, 2006]. При работе в замкнутом контуре, как показано на рис. 2, измеряются искажения волнового фронта после корректора, что позволяет иметь обратную связь и контроль коррекции изображения. Рабочий пучок отделяется от контрольного некоторым светоделительным элементом (кубиком или зеркальным фильтром) и направляется для питания научных приборов. А контрольный пучок — менее яркий — направляется на ДВФ. В разрабатываемой системе в общем случае используется контур замкнутого типа.

В АО системах для Солнца в качестве датчика используется датчик Шака-Гартмана. Главными элементами датчика являются приёмник и линзовый растр (лензлет). С помощью линзлета на фотоприёмнике фокусируется массив изображений предмета — гартманограмма. Принцип действия самого датчика основан на измерении смещений изображений, по которым определяется

численное выражение аберраций волнового фронта, например, в терминах полиномов Цернике. В случае Солнца мы имеем изображение некоторой протяжённой области, а не точечного источника. Разница в том, что в фокальной плоскости изображения субапертур представляют собой изображения солнечной поверхности, как показано на рис. 3. Вместо смещений точек с помощью кросс-корреляционных методов измеряются смещения изображений. Для того чтобы функция кросс-корреляции имела выраженный максимум, изображение должно иметь какие-то контрастные детали [Антошкин и др., 2016]. Примером такого изображения является грануляция, которая наблюдается повсеместно на диске Солнца. Однако её контраст невысок и составляет порядка 10–12 %, а в наземных наблюдениях — всего 2–4 %. Другие объекты — это пятна и поры, которые обладают чётко выраженными деталями. В обоих случаях характерные детали имеют угловой размер порядка 2 секунд дуги, следовательно, диаметр субапертуры в пересчёте на входной зрачок должен позволять разрешать эти детали в изображении. Его можно оценить по критерию Рэля $\psi_{\min} = 1,22 D/\lambda$, где ψ_{\min} — минимальный угловой размер разрешаемого объекта; λ — длина волны; D — диаметр апертуры. Таким образом, при диаметре 12–13 см можно различать детали порядка 1", при 6–7 см — порядка 2". С другой стороны, характерный пространственный масштаб искажений определяется r_0 (см. рис. 1). При измерении искажений ВФ нужно иметь возможность регистрации таких средних масштабов, следовательно, размер субапертуры не должен значительно отличаться от r_0 . Становится ясно, что у системы должны быть разные режимы работы, зависящие от наблюдаемого объекта и качества изображения.

Следующим важным элементом системы является корректор волнового фронта. В простом случае он представляет собой качающееся зеркало с двумя-тремя степенями свободы (тип-тилт), исправляющее только общий наклон ВФ. Искажения более высоких порядков устраняются с помощью деформируемых зеркал. Для управления ими при калибровке системы рассчитывается матрица влияния, которая содержит отклик датчика на срабатывание каждого актюатора. Комбинация этих матриц позволяет задать любую форму в пределах технических возможностей зеркала [Porter, 2006].

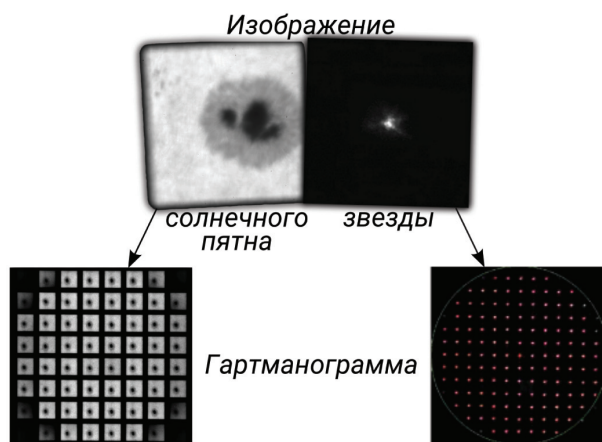


Рис. 3. Сравнение гартманнограмм звезды и Солнца

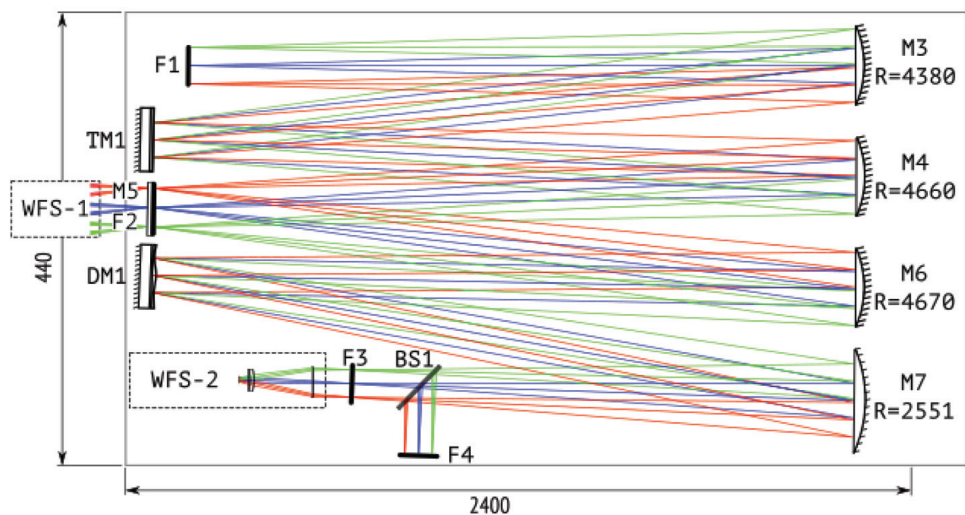


Рис. 4. Итоговая схема АОС (размеры в мм)

Для функционирования как при полной (720 мм), так и при диафрагмированной (600 мм) апертурах была проведена работа по расчёту схемы вспомогательной оптики. В процессе работы были рассмотрены несколько вариантов, которые оценивались по разным критериям: обеспечение требуемых характеристик, влияние вспомогательной оптики на качество изображения, стоимость и сложность изготовления, удобство юстировки и доступа к элементам. На рис. 4 изображена итоговая оптическая схема с указанием радиусов кривизны силовых зеркал. В главном фокусе телескопа F1 расположена диафрагма, определяющая поле зрения системы. Коллиматорные зеркала M3 и M6 строят изображения входного зрачка размером 33,5 мм для диафрагмированной или 40,5 мм для полной апертур телескопа на тип-тилта (TM1) и деформируемом зеркале (DM1). Максимальный размер зрачка выбран, исходя из диаметра имеющегося деформируемого зеркала — 50 мм — за вычетом краевого эффекта мембраны. Камерное зеркало M4 обеспечивает промежуточную фокальную плоскость, в которой установлен ДВФ тип-тилта (WFS-1), который может быть использован для получения контрольного неисправленного изображения. Поле зрения WFS-1 составляет 70" или 115,8" при масштабе изображения 40,9 или 67 мкм/угл. с соответственно. Перед фокусом камерного зеркала M7, которое строит изображение Солнца, расположен светоделиитель. За фокальной плоскостью F3 расположен окуляр, строящий зрачок размером 3,77 на WFS-2, который имеет поле зрения до 48" при масштабах 5,8 или 8,9 мкм/угл. с. Фокальная плоскость F4 предназначена для научного оборудования. Компактность рассчитанной схемы позволяет оптимально использовать пространства оптического стола, оставляя 70–80 см рабочей зоны. Аберрации силовых зеркал минимальны за счёт малых углов падения лучей. Все элементы схемы расположены на одной высоте, что значительно упрощает сборку и юстировку схемы, и уменьшает требования к монтажным устройствам.

Вспомогательная оптика была изготовлена в лаборатории оптики ИСЗФ СО РАН и испытана с зеркалом тип-тилт производства ИОА СО РАН на теле-

скопе. Параметры изображений, полученных на датчиках и активных зеркалах, соответствуют расчётным. В дальнейшем планируется установка деформируемых зеркал и отладка управляющих алгоритмов.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп (<http://ckp-rf.ru/usu/200615/>).

ЛИТЕРАТУРА

- [Антошкин и др., 2016] Антошкин Л., Ботыгина Н., Больбасова Л., Емалеев О., Коняев П., Копылов Е., Ковадло П., Колобов Д., Кудряшов А., Лавринов В., Лавринова Л., Лукин В., Чупраков С., Селин А., Шиховцев А. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. С. 895–904.
- [Лукин и др., 1999] Лукин В., Фортес Б., Антошкин Л., Ботыгина Н., Емалеев О., Лавринова Л., Петров А., Янков А., Булатов А., Ковадло П., Фирстова Н. Экспериментальная адаптивная оптическая система для большого солнечного вакуумного телескопа. I. Результаты тестирования и перспективы развития // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. С. 1161–1164.
- [Степанов и др., 1979] Степанов В. Е., Банин В. Г., Круглов В. И. Экспериментальный макет большого солнечного вакуумного телескопа (ЭМ БСВТ) СибИЗМИР // Новая техника в астрономии. 1979. С. 42–51.
- [Jess et al., 2012] Jess D. B., de Moortel I., Mathioudakis M., Christian D. J., Reardon K. P., Keys P. H., Keenan F. P. The source of 3 minute magnetoacoustic oscillations in coronal fans // Astrophysical J. 2012. V. 757. P. 160.
- [Porter, 2006] Porter J. Control Algorithms: Ch. 5 // Adaptive optics for vision science / eds. J. Porter, H. M. Queener, J. E. Lin, K. Thorn, Abdul Awwal. Wiley-Interscience, 2006. P. 119–139.

ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM FOR LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE

*I. Russkikh¹, A. Shikhovtsev¹, S. Chuprakov¹, A. Kiselev¹, V. Tomin¹,
V. Skomorovsky¹, P. Kovadlo¹, V. Lukin², D. Kolobov¹*

¹ Institute of Solar-Terrestrial physics of the Siberian branch of Russian Academy of Sciences

² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (IAO SB RAS)

The research of the solar atmosphere fine structure is one of the most important experimental problem of the modern Solar Physics. The resolution of the ground-based telescopes, which are the main instruments for obtaining information about solar phenomena structure, is limited by atmosphere turbulence. In ideal case the optical paths of the rays which form the wavefront at the entrance aperture of the telescope must be equal to achieve the diffraction-limited point spread function. In Earth atmosphere conditions optical path difference (OPD) is caused by the turbulent air mixing with different temperature and accordingly different density and refractive index. This OPD forms wavefront aberrations. With regular atmospheric conditions one can expect telescope resolution to be about 1.5–2". The size of the fine structure phenomena of the Solar atmosphere is about 0.1" Observation of these phenomena with such a resolution in real-

time becomes possible due to wavefront correction with adaptive optical systems. The latter uses Shack-Hartmann wavefront sensors to measure wavefront aberrations and deformable and tip-tilt mirrors to correct them. Both devices are placed in the conjugate plane. The paper discusses the results of the adaptive optics and the atmosphere research performed by ISTP SB RAS (Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian branch of Russian Academy of science). The design of the multi-mirror adaptive optical system for the Large Solar vacuum telescope is based on solving the number of tasks, including the determination of the spatial scales of the turbulent Earth atmosphere and scales of the optical system in conjugated planes. Modeling helps to determine the optical system parameters to accommodate adaptive and telescope optical systems.

Keywords: telescope, adaptive optics

Russkikh Ivan V. — Senior Engineer-Programmer, vanekrus@iszf.irk.ru

Shikhovtsev Artem Yu. — Researcher, PhD, Ashikhovtsev@iszf.irk.ru

Chuprakov Sergey A. — Senior Researcher, PhD, chupr@iszf.irk.ru

Kiselev Alexander V. — Junior Researcher, kiselev@iszf.irk.ru

Tomin Vitaliy E. — Junior Researcher, tomin@iszf.irk.ru

Skomorovsky Valery I. — Head of Laboratory, Dr. Sci. in Physics and Maths, skoal@iszf.irk.ru

Kovadlo Pavel G. — Senior Researcher, Dr. Sci. in Physics and Maths, kovadlo@iszf.irk.ru

Lukin Vladimir P. — Head of Laboratory, Dr. Sci. in Physics and Maths, lukin@iao.ru

Kolobov Dmitri Yu. — Head of Laboratory, PhD, kolobov@iszf.irk.ru

МАСШТАБИРУЕМЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ СОСТОЯНИЯ НАЗЕМНОГО И ОРБИТАЛЬНОГО СЕГМЕНТА СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ

*В. В. Сазонов, М. В. Егоров, О. В. Морозов,
Т. Е. Романенко, И. А. Самыловский, А. Н. Семёнов*

Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

В рамках настоящей работы создан и введён в эксплуатацию программный комплекс, позволяющей производить моделирование движения элементов орбитальной группировки и отображение состояния составных частей орбитальной группировки и наземного сегмента на основе доступной информации.

Архитектура комплекса позволяет адаптировать его для моделирования, визуализации и контроля группировок как на околоземных орбитах, так и в дальнем космосе.

Ключевые слова: Трёхмерная визуализация, рендеринг рельефа, виртуальный глобус, орбитальная группировка, созвездие спутников, видеостена

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием технологий дистанционного зондирования Земли и связанного рынка коммерческих услуг по оперативному предоставлению конечному пользователю данных, полученных с целевых спутников, возникает потребность в решениях по оперативному контролю различных этапов поставки продукции ДЗЗ, подходящих для использования прямыми и транзитными поставщиками соответствующих услуг. Потенциальными потребителями таких решений являются появляющиеся в России и за рубежом новые частные компании, претендующие на различные сегменты этого рынка (предоставление снимков в различных диапазонах, с различным уровнем обработки, для различных целей и т.д.).

В ходе выполнения инициативной разработки создан комплекс программных модулей, предоставляющий пользователю возможности по организации «локального центра контроля и отображения» и имеющий возможности как к расширению, так и к модернизации функциональности до уровня «корпоративного центра управления полётами». Программные модули, составляющие комплекс, позволяют осуществлять конфигурирование отображения баллистической обстановки в околоземном пространстве на многомониторной видеостене и в интерактивном режиме осуществлять управление отображением с использованием сенсорного видеостола.

Сазонов Василий Викторович — кандидат физико-математических наук, доцент

Егоров Матвей Владимирович — специалист

Морозов Олег Вячеславович — кандидат физико-математических наук, специалист

Романенко Татьяна Евгеньевна — кандидат физико-математических наук, ассистент

Самыловский Иван Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент, ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

Семёнов Алексей Николаевич — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник

Реализация комплекса с использованием кросс-платформенных технологий и библиотек с открытым исходным кодом (osgEarth, Qt) позволяет использовать его на автоматизированном рабочем месте (АРМ) под управлением как операционной системы (ОС) Windows, так и систем, основанных на ОС UNIX, в том числе специализированных. Архитектура комплекса допускает гибкое конфигурирование в зависимости от требований оператора, а также масштабирование в ходе добавления новых объектов отображения (космические аппараты, станции приёма информации, антенные системы, здания, объекты инфраструктуры и т.д.), в том числе многоэлементные.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

В текущей реализации комплекс организован в виде набора следующих составных частей:

- 1) программный модуль управления;
- 2) программный модуль отображения;
- 3) программный модуль хранения.

Программный модуль хранения осуществляет взаимодействие модулей-клиентов с базами данных информации об отображаемых объектах, включая структуру моделируемой сцены. Кроме того, модуль предоставляет возможности по загрузке информации из внешних источников информации (в настоящий момент таковыми являются открытые источники наборов орбитальных элементов).

Программный модуль отображения осуществляет разномасштабное отображение сцены, сформированной на основе информации, предоставленной модулем хранения. Сцена может включать в себя модели планетарного эллипсоида, цифровые модели рельефа, космические снимки, геометрические модели космических аппаратов, объектов инфраструктуры и т.д.

Программный модуль управления позволяет оператору изменять параметры отображения на экземпляре модуля отображения, к которому подключён данный модуль управления через сетевой протокол ТСР/ІР. Действия оператора включают в себя взаимодействие с графическим пользовательским интерфейсом, сенсорные жесты (прокрутка, поворот камеры и т.д.), изменение расположения окна модуля отображения на мониторах — составных частях видеостены и т.д.

Таким образом, в зависимости от настроек сцены, набора информации, сформированного в базе данных, и целей использования, комплекс позволяет в режиме реального времени осуществлять визуальный контроль состояния объектов сцены, которая может представлять собой как детальную иерархическую модель единичного изделия, так и совокупность элементов наземной и орбитальной инфраструктуры системы, функционирующей как в рамках околоземного пространства, так и в других пространственных масштабах.

Функциональная схема взаимодействия модуля управления, модуля отображения и модуля хранения представлена на рис. 1.

Функциональная схема взаимодействия видеостола с запущенными экземплярами модуля управления и АРМ отображения представлена на рис. 2.

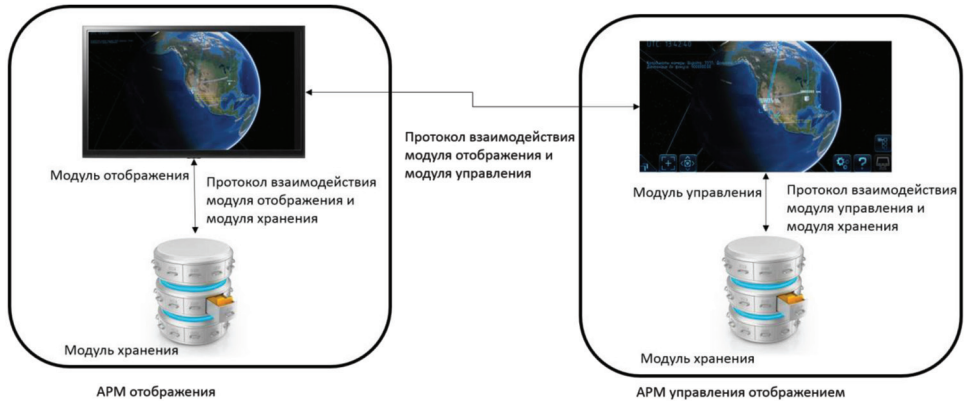


Рис. 1. Функциональная схема взаимодействия модуля управления, модуля отображения и модуля хранения на сети из двух ARМ

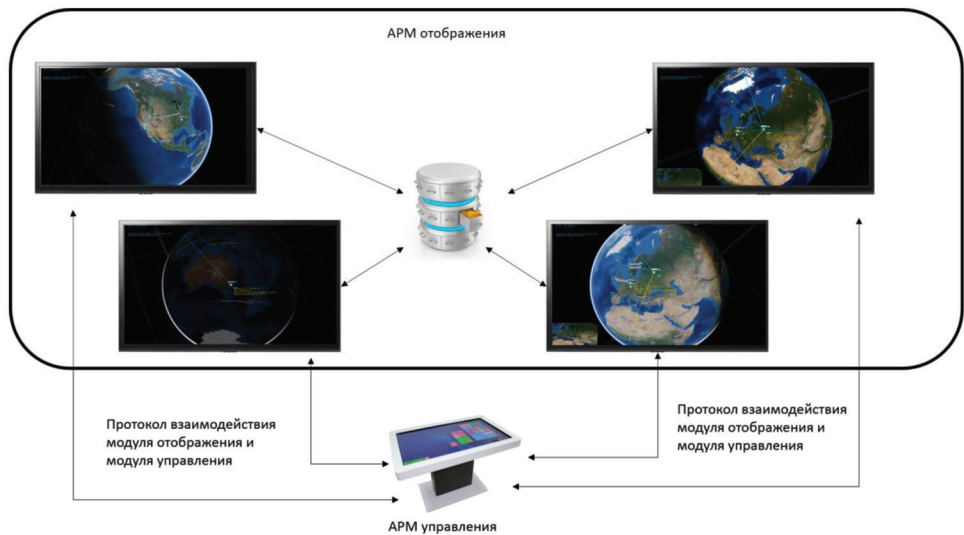


Рис. 2. Функциональная схема взаимодействия видеостены АРМ отображения и АРМ управления сенсорного стола

ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗОВАННЫХ СЦЕНАРИЕВ РАБОТЫ

В настоящем разделе приведены примеры различных вариантов использования составных частей программного комплекса на настольных компьютерах, четырёхмониторных средствах коллективного отображения, а также на сенсорном видеостоле.

Так, рис. 3 демонстрирует работу нескольких экземпляров модуля управления на сенсорном видеостоле. Показаны такие возможности, как отображение земного эллипсоида, отображение траекторий движения космических аппаратов, сигнализация об изменении состояния элементов, а также элементы древовидной структуры для управления отображением.



Рис. 3. Пример работы модуля управления отображением на сенсорном видеостоле

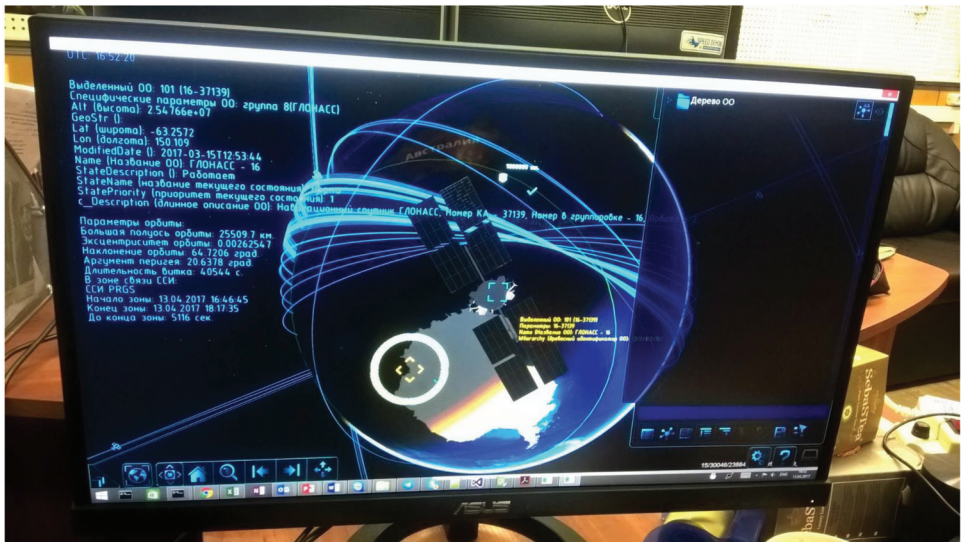


Рис. 4. Пример отображения модели космического аппарата и вывода метаинформации

Рисунок 4 демонстрирует отображение модели навигационного спутника (КА «Глонасс») на АРМ оператора, основанном на обычном настольном компьютере.

Рисунок 5 демонстрирует возможности по отображению многоэлементной орбитальной группировки в околоземном пространстве с возможностью переключения стилей отображения траекторий, зон видимости и геометрических моделей.

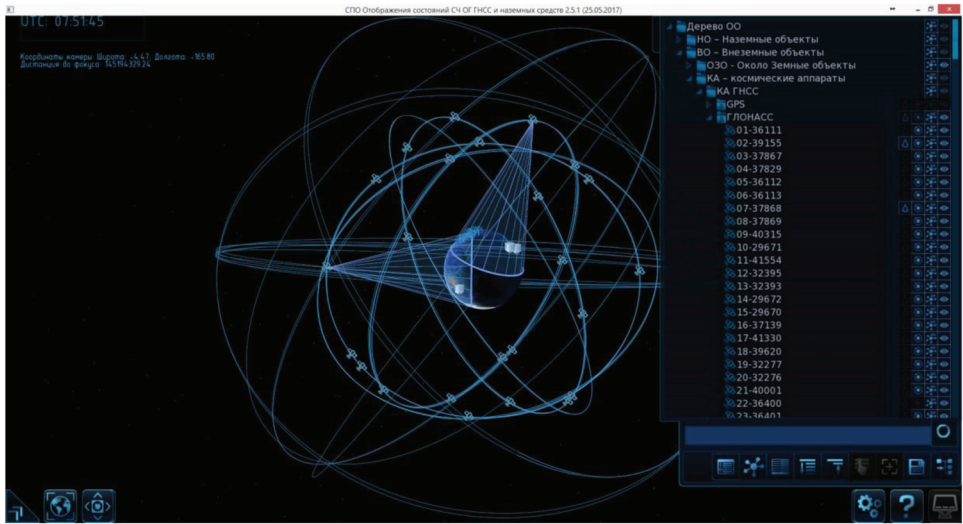


Рис. 5. Отображение орбитальной группировки

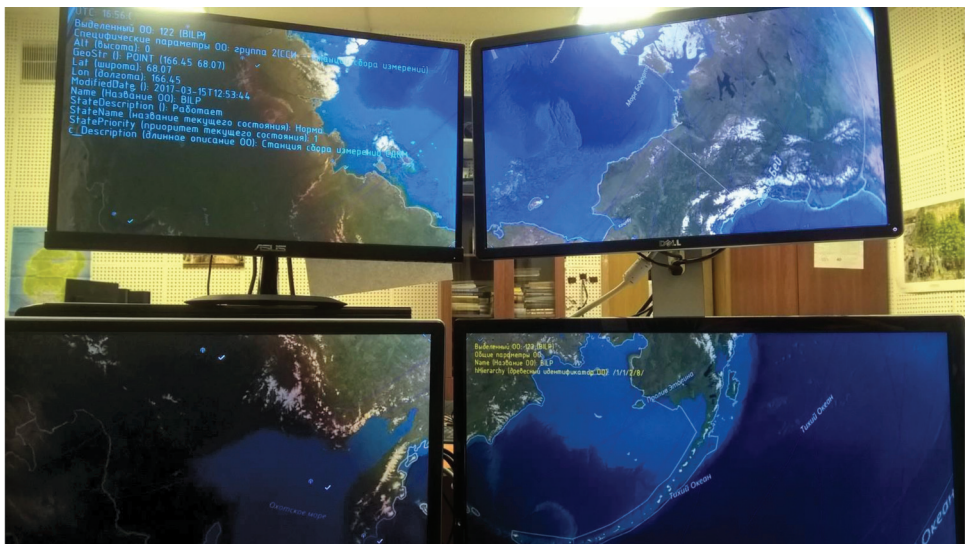


Рис. 6. Отображение картографической информации на средствах коллективного отображения

Рисунок 6 демонстрирует отображение участка земного эллипсоида на четырёхмониторных средствах коллективного отображения с выводом служебной информации. Рисунок 7 демонстрирует отображение детальной модели космического аппарата с выводом служебной информации. При этом отображаются станции, находящиеся в зоне видимости аппарата, выводится служебная информация о зонах связи с наземными антеннами. Оператору доступна возможность управления отображением объекта (изменение ориентации солнечных батарей, сборка и разборка конструкции, подсветка выделенных иерархических элементов и т. д.)

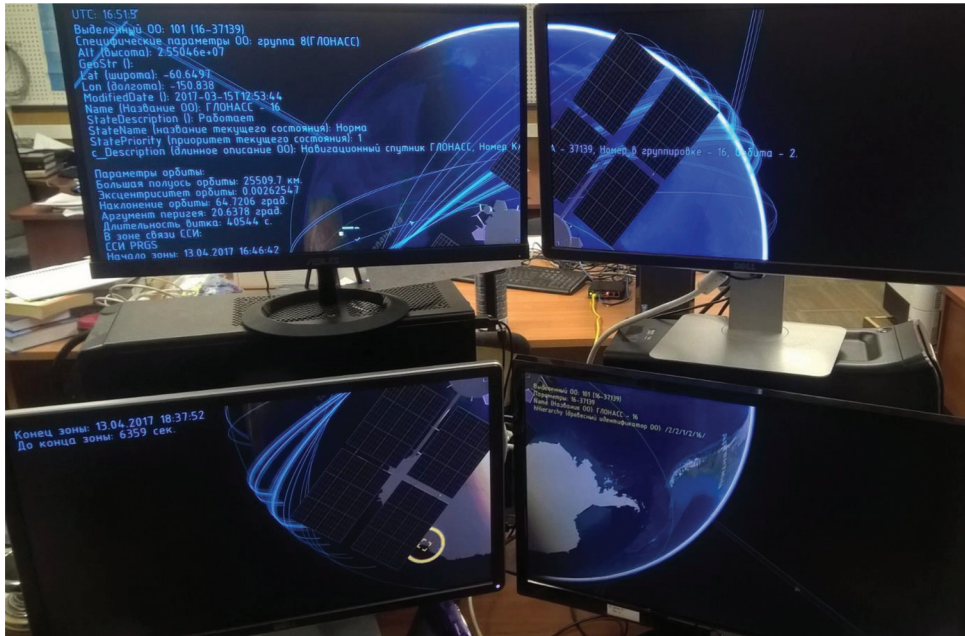


Рис. 7. Отображение детальной модели космического аппарата на средствах коллективного отображения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ

Таким образом, в ходе выполнения данной работы создан комплекс программных модулей, предоставляющий пользователю функциональность по интерактивной визуализации состояния наземного и орбитального сегментов спутниковой группировки.

Программный комплекс поддерживает настройку структуры отображаемой сцены от уровня отдельного изделия (космический аппарат, антенна и т.д.) до уровня околоземного пространства (Земля, рельеф, модели наземных и орбитальных объектов и т.д.).

Следует отметить, что архитектура комплекса допускает добавление новых отображаемых объектов, добавление новых корневых элементов сцены (Луна и планеты), новых КА и т.д.

Разработанные решения могут быть использованы при разработке программного обеспечения центров управления полётами аппаратов, действующих в околоземном пространстве и в дальнем космосе.

SCALABLE SOFTWARE COMPLEX FOR SATELLITE GROUP TERRESTRIAL AND ORBITAL SEGMENTS INTERACTIVE MODELING AND VISUALIZATION

V. V. Sazonov, M. V. Egorov, O. V. Morozov, T. E. Romanenko, I. A. Samylovskiy, A. N. Semenov

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

During this work, a software complex for modeling and visualization of orbital group elements (satellites, antennas etc.) has been created. Complex works on multi-monitor videowalls and allows user to visualize (in interactive and real-time mode) how terrestrial and orbital segments evolve in time w. r. t. changing environment.

Software architecture allows to use it for modeling, visualization and control of satellites groups in near and deep space (lunar mission etc.).

Keywords: Three-dimensional visualization, terrain rendering, virtual globe, orbital group, satellites constellation

Sazonov Vasilij V. — PhD, associate Professor

Egorov Matvey V. — specialist

Morozov Oleg V. — PhD, specialist

Romanenko Tatiana E. — PhD, assistant Professor

Samylovskiy Ivan A. — PhD, associate Professor, ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

Semenov Alexey N. — PhD, junior Research Assistant

МАСШТАБИРУЕМЫЙ КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ В СОСТАВЕ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА ГРУППИРОВКИ СПУТНИКОВ ДЗЗ

*В. В. Сазонов, М. В. Егоров, О. В. Морозов, И. Д. Мухамеджанов,
С. В. Сазонова, И. А. Самыловский, А. С. Сапелкин*

Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

В ходе выполнения данных работ создан комплекс программных модулей, предоставляющий пользователю функциональность по расчёту углов наведения наземной антенны на космический аппарат для формирования файлов целеуказаний, используемых в дальнейшем для осуществления сеанса связи.

Модули позволяют в зависимости от требуемой задачи формировать программные конвейеры для ручного и автоматизированного управления наземной антенной, для приёма заявок на проведение сеансов, а также для визуального моделирования баллистико-навигационной обстановки.

Разработанные решения могут быть использованы при разработке программного обеспечения наземного сегмента перспективных орбитальных группировок и отдельных космических аппаратов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, антенная система, расчёт сеансов связи, автоматизированное управление

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается значительное развитие как технологий дистанционного зондирования Земли, так и связанного рынка коммерческих услуг по оперативному предоставлению конечному пользователю данных, полученных с целевых спутников. В России и за рубежом появляются новые частные компании, претендующие на различные сегменты этого рынка (предоставление снимков в различных диапазонах, с различным уровнем обработки, для различных целей и т.д.). В перспективе это ожидаемо должно привести к появлению компаний, функционирующих в рамках полного цикла «космический аппарат – наземный приёмный комплекс – распределённая система хранения – конечный пользователь». Предлагаемое в рамках настоящей работы решение может быть использовано для того, чтобы предоставить как для таких компаний, так и для научных и образовательных организаций продукт, способный к адаптации под конкретные аппаратные средства и предоставляющий функциональность по подготовке программ наведения антенных систем на различные КА для приёма с них сигнала и его передачи для дальнейшей обработки.

Сазонов Василий Викторович — кандидат физико-математических наук, доцент

Егоров Матвей Владимирович — специалист

Морозов Олег Вячеславович — кандидат физико-математических наук, специалист

Мухамеджанов Ильдар Давлетович — магистрант

Сазонова Софья Викторовна — специалист

Самыловский Иван Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент,
ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

Сапелкин Арсений Сергеевич — специалист

В ходе выполнения инициативной разработки создан комплекс программных модулей, предоставляющей пользователю следующую функциональность:

- 1) формирование и корректировка списка целевых космических аппаратов для расчёта сеансов связи;
- 2) расчёт сеансов связи в виде наборов углов наведения наземной антенны на космический аппарат либо целевую точку космического пространства;
- 3) формирование и редактирование пакетов сеансов связи для закладки на антенну (отслеживание перекрытия сеансов и т.д.);
- 4) ручное и программное управление антенной системой в соответствии с предоставляемым протоколом информационного взаимодействия;
- 5) отображение состояния антенной системы, выдача оператору сообщений о неисправностях, о текущем состоянии подсистем антенны и т.д.;
- 6) отображение спектра принимаемого сигнала;
- 7) формирование отчётов о проведённом сеансе связи, автоматическое сохранение их в локальном или удалённом хранилище и визуализация отчётов;
- 8) моделирование баллистико-навигационной обстановки на заданный период.

Комплекс программных средств позволяет пользователю в зависимости от конкретной задачи и оснащения аппаратных средств формировать программные «конвейеры» для реализации как полного цикла «моделирование баллистико-навигационной обстановки — расчёт сеанса — моделирование сеанса — отработка сеанса — ретроспективный анализ сеанса», так и составных частей этого цикла с возможностью отработки как в режиме командной строки, так и в режиме графического пользовательского интерфейса.

Реализация комплекса с использованием кросс-платформенных технологий и библиотек с открытым исходным кодом позволяет использовать его на АРМ под управлением как ОС Windows, так и систем, основанных на ОС UNIX, в том числе специализированных. Архитектура комплекса допускает гибкое конфигурирование в зависимости от требований оператора, а также масштабирование в ходе добавления новых КА и антенных систем.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Функционально комплекс организован в виде набора следующих составных частей:

- 1) модуль расчёта сессий связи;
- 2) модуль моделирования сессий;
- 3) модуль ручного и программного управления антенной;
- 4) модуль просмотра отчётов о сессиях связи;
- 5) клиент системы планирования, реализующий приём новых заявок на проведение сеансов связи;
- 6) клиент системы хранения, реализующий взаимодействие с базой данных результатов работы;
- 7) визуальный модуль моделирования баллистико-навигационной обстановки.

В настоящей работе подробно описана работа компонент 1–4.

Таким образом, в зависимости от задач и технических условий возможна организация следующих программных конвейеров работы системы управления антенной:

1. В случае отсутствия соединения с сервером антенны и невозможности осуществления трёхмерного графического отображения программного обеспечения (ПО) допускает расчёт отдельных сессий и формирования пакетов сессий для последующего использования.
2. В случае соединения с сервером антенны (при условии совместимости протоколов информационного взаимодействия) ПО допускает отправку сформированных пакетов на сервер антенны и двумерное графическое отображение изменения ориентации антенны
3. В случае наличия видеокарты, допускающей трёхмерное отображение, ПО позволяет осуществлять моделирование баллистико-навигационной обстановки
4. При наличии соединения с системой планирования и системой хранения информации ПО допускает загрузку баллистических данных из удалённого хранилища и автоматического инициирования расчёта сессий для выполнения вновь полученных заявок.

МОДУЛЬ РАСЧЁТА СЕССИЙ И ФОРМИРОВАНИЯ ПАКЕТОВ СЕССИЙ СВЯЗИ

Модуль расчёта сеансов и формирования пакетов сеансов предоставляет оператору функциональность по добавлению новых КА из файлов орбитальных элементов (TLE — two-line element set), а также из файлов, содержащих наборы фазовых векторов, в том числе и в виде начальных условий для расчёта (propagation) траекторий движения КА в различных системах координат.

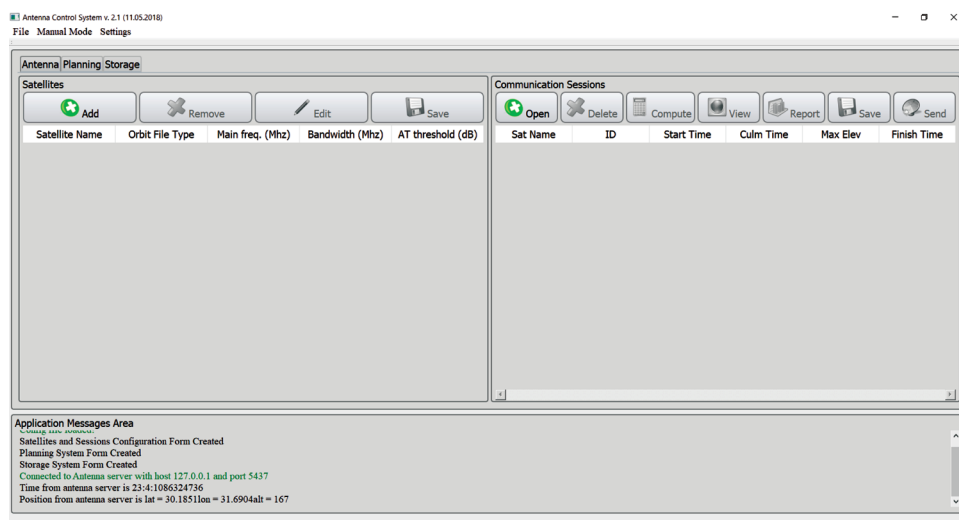


Рис. 1. Основное окно модуля формирования пакетов сеансов

На рис. 1 (см. с. 98) показано основное окно модуля, содержащее таблицы загруженных КА и рассчитанных сеансов, а также элементы интерфейса для редактирования списков объектов.

Рисунок 2 демонстрирует функциональность по редактированию параметров сигнала, который антенна будет принимать с выбранного КА.

Пользователь имеет возможность выбрать пакет КА и рассчитать для них сеансы связи на заданный период. Рисунок 3 демонстрирует возможности программы по формированию пакетов сеансов для дальнейшей закладки на антенну: отмечены перекрывающиеся сеансы, в зависимости от того, какой набор выбрал пользователь, программа допускает либо не допускает отправку соответствующего пакета на антенну.

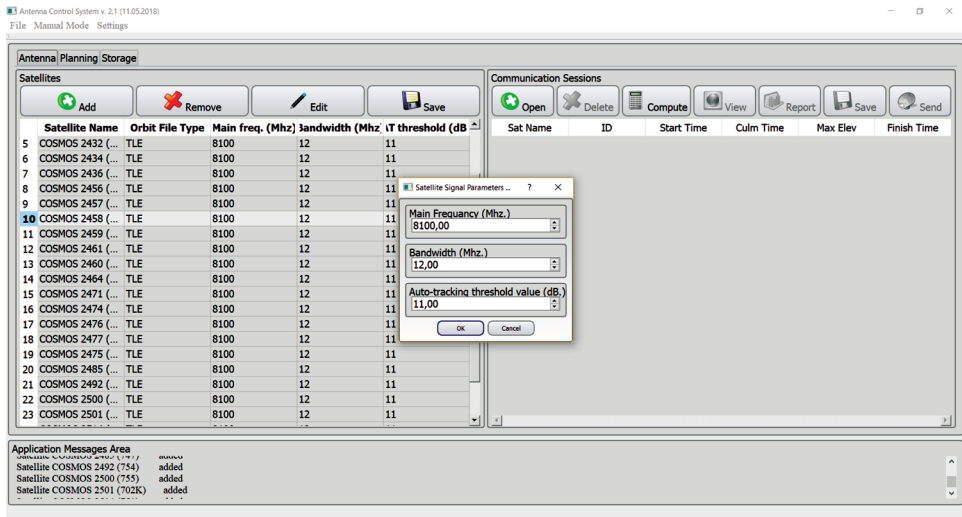


Рис. 2. Пользователь добавил набор КА из файлов орбитальных элементов

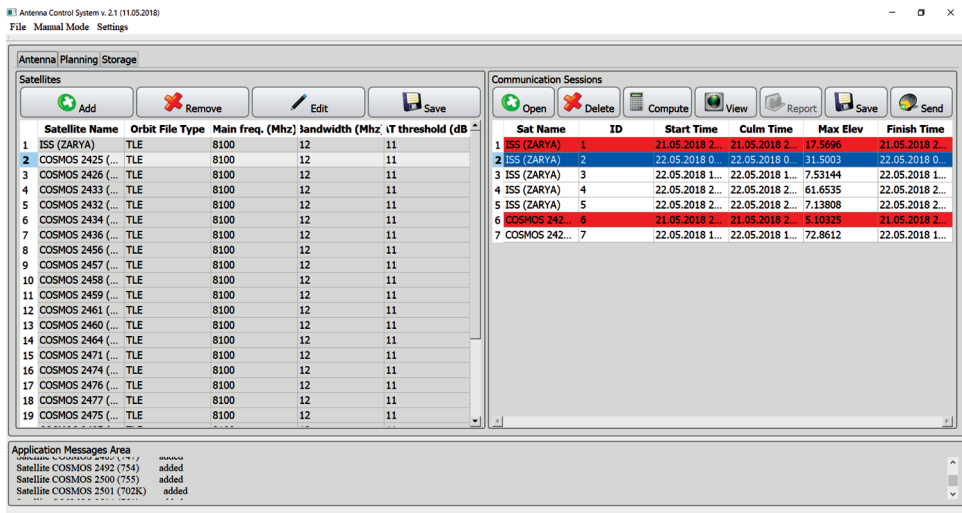


Рис. 3. Отслеживание перекрывающихся сессий

МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕАНСОВ СВЯЗИ

Перед отправкой пакета на антенну оператор имеет возможность осуществить моделирование рассчитанных сеансов, включающее в себя моделирование баллистико-навигационной и светотеневой обстановки на рассчитанном интервале. Эта функциональность предоставляется модулем моделирования сеансов. Соответствующий экран продемонстрирован на рис. 4.

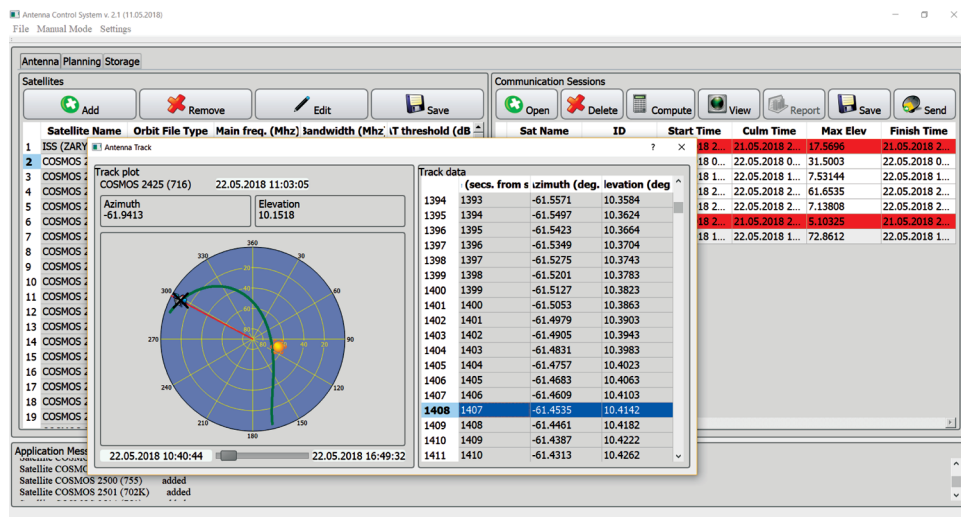


Рис. 4. Режим моделирование сеанса. Оператор имеет возможность переключать моделируемое время и наблюдать изменение баллистико-навигационной и светотеневой обстановки

МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ

Составная часть программного комплекса — модуль управления антенной системой — предоставляет оператору функциональность по ручному управлению антенной, включая изменение скоростей движения, наведение на точки космического пространства, а также наведение на Солнце и парковку в зенит для тестирования параметров приёма сигнала и обеспечения устойчивости антенны к порывам ветра между сеансами связи. Соответствующий экран представлен на рис. 5 (см. с. 101).

Модуль также осуществляет отображение принимаемого спектра сигнала и сигнализацию о неисправностях. При этом оператор имеет доступ к отображению состояния подсистем антенны. Соответствующие элементы интерфейса осуществляют маркировку задействованных подсистем (например, при перемещении антенны маркируются работающие приводы), а также при необходимости маркировку подсистем, в работе которых есть неисправности (например, при отсутствии питания либо при отсутствии диагностической информации). Соответствующий экран приведён на рис. 6 (см. с. 101).

Наряду с ручным управлением, программный комплекс допускает автоматическую обработку пакетов сеансов. В этом случае необходимо лишь сформировать пакет из рассчитанных сеансов и отправить на сервер антенны. Программный комплекс выберет ближайшую по времени сессию и осуществит наведение антенны на её начальную точку, как демонстрирует рис. 7 (см. с. 102).

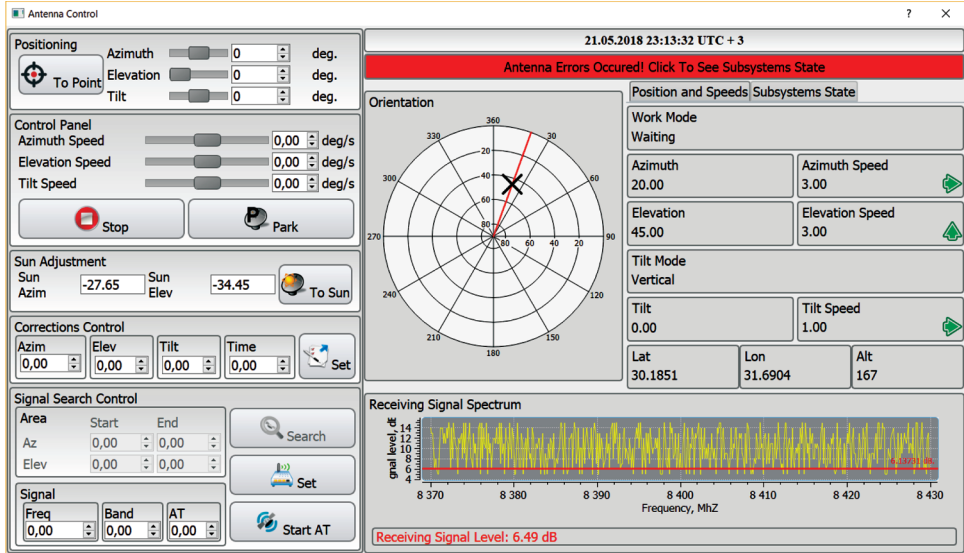


Рис. 5. Режим ручного управления антенной. Оператор имеет возможность отправлять на сервер команды, наблюдать изменение ориентации антенны, отслеживать параметры движения. Кроме того, оператору приходят оповещения о неисправностях

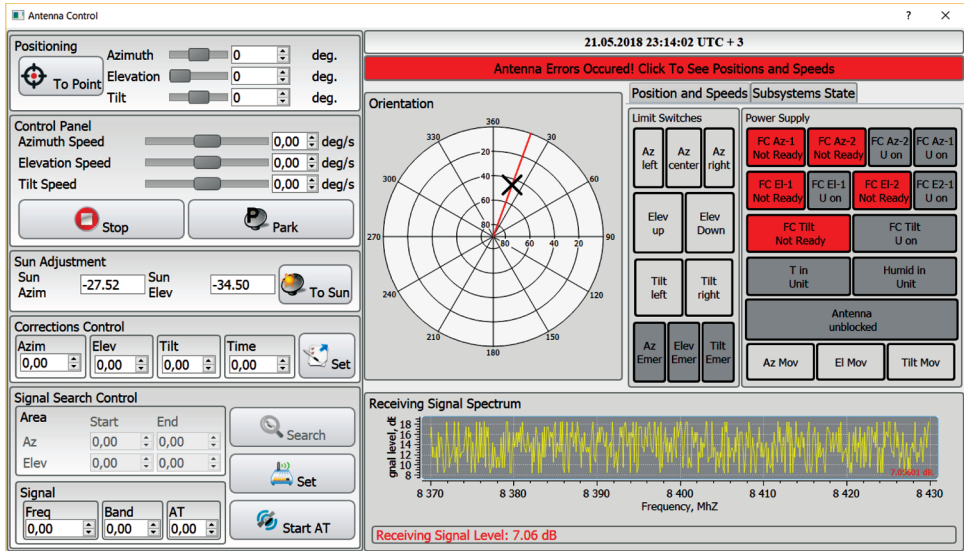


Рис. 6. Отображение состояния подсистем антенны

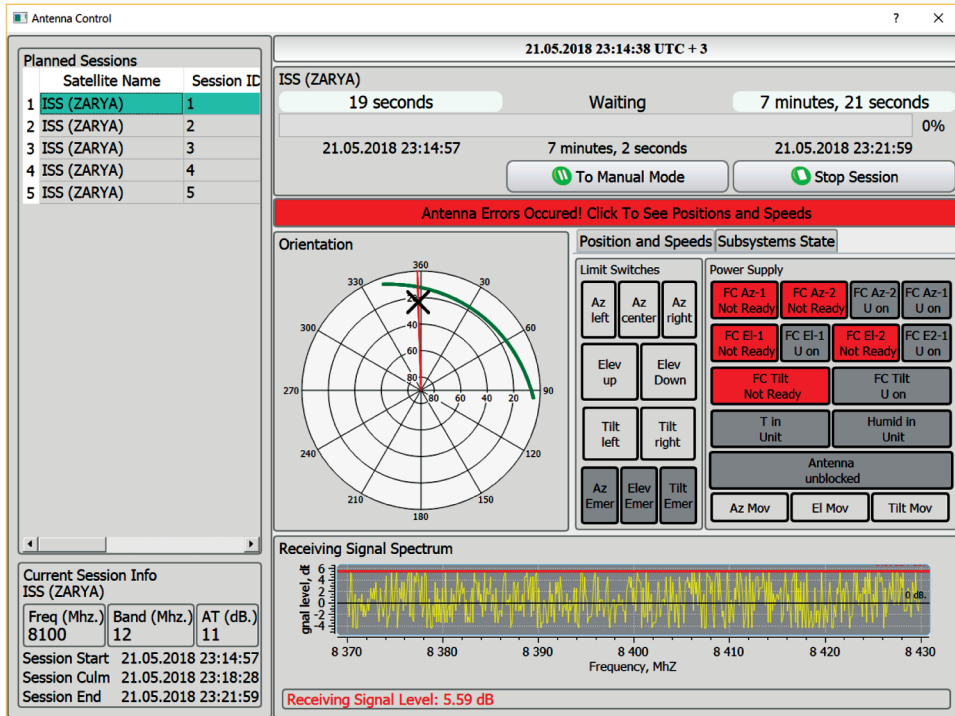


Рис. 7. Автоматическая обработка пакета сессий. Антенна перемещается к началу ближайшей сессии для захвата объекта

Рисунки 8 и 9 (см. с. 103) демонстрируют различные этапы обработки сессии. Оператор наблюдает состояние приёма сигнала, визуальное отображение наведения антенны на сессию, возможное расхождение актуального и расчётного движения антенны (см. рис. 8).

При необходимости оператор может в ручном режиме задать параметры коррекции траектории либо перейти в режим автосопровождения (либо изменить параметры порога автосопровождения для более эффективного захвата объекта наведения). Соответствующая функциональность показана на рис. 9.

После обработки программный комплекс в автоматизированном режиме генерирует отчёт о сеансе и производит перенацеливание антенны на начальную точку следующего по времени сеанса, как показано на рис. 10 (см. с. 104).

МОДУЛЬ ПРОСМОТРА ОТЧЁТОВ О СЕАНСЕ СВЯЗИ

Оператор при этом имеет возможность просмотра параметров проведённого сеанса, анализа ошибок наведения, а также отправки текстовой и графической части отчёта на печать в электронный документ либо на печатающее устройство. Соответствующий экран показан на рис. 11 (см. с. 104).

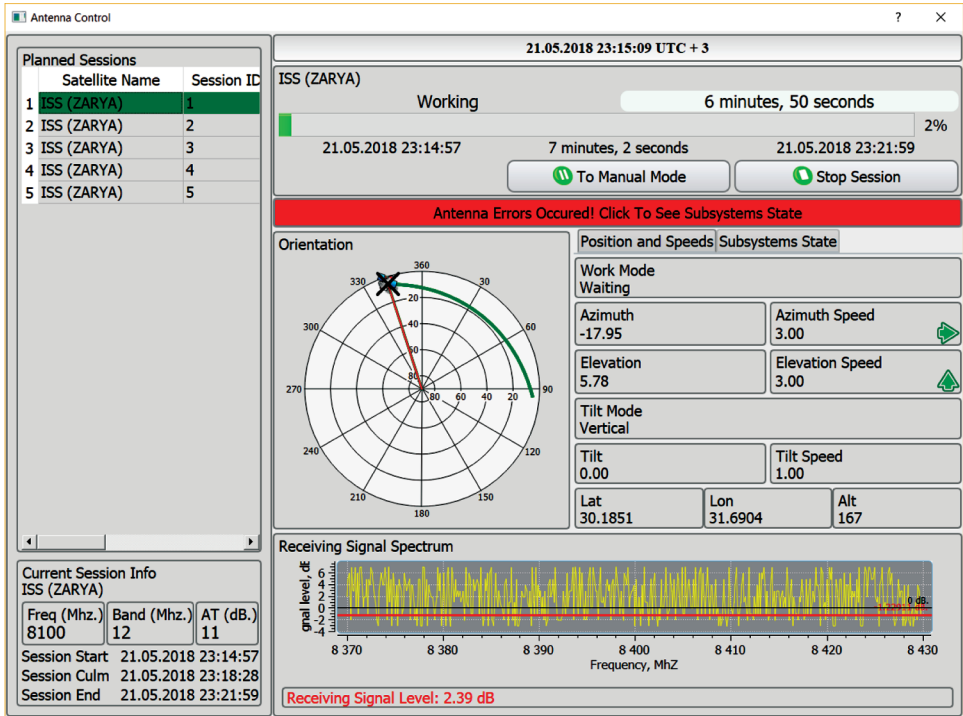


Рис. 8. Автоматическая отработка сессии. Антенна движется, сопровождая объект, оператор имеет возможность наблюдать отклонение реального движения от расчётного

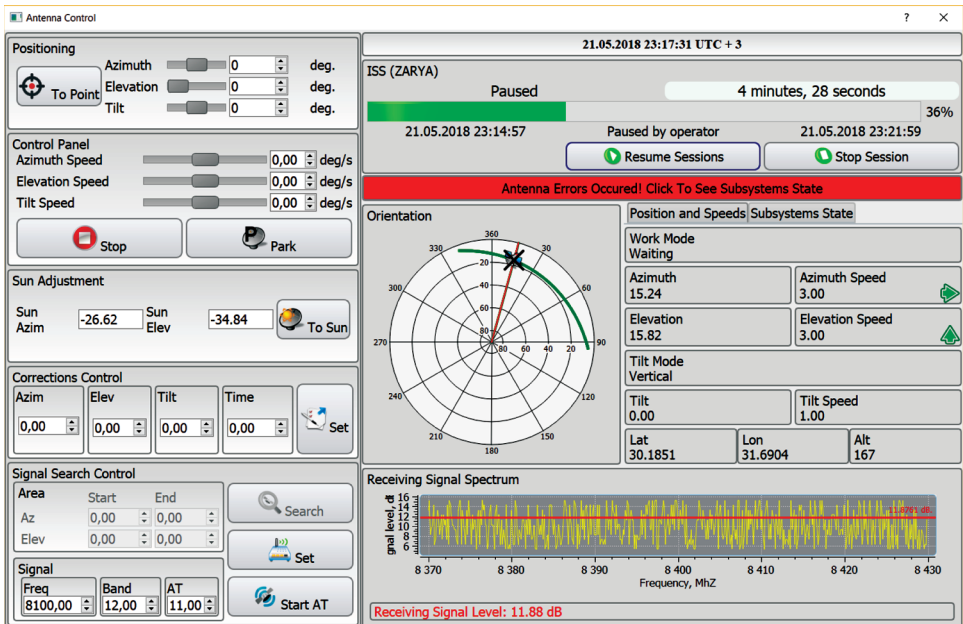


Рис. 9. Автоматическая отработка сеанса. Пользователь имеет возможность в режиме реального времени внести корректировки в движение антенны

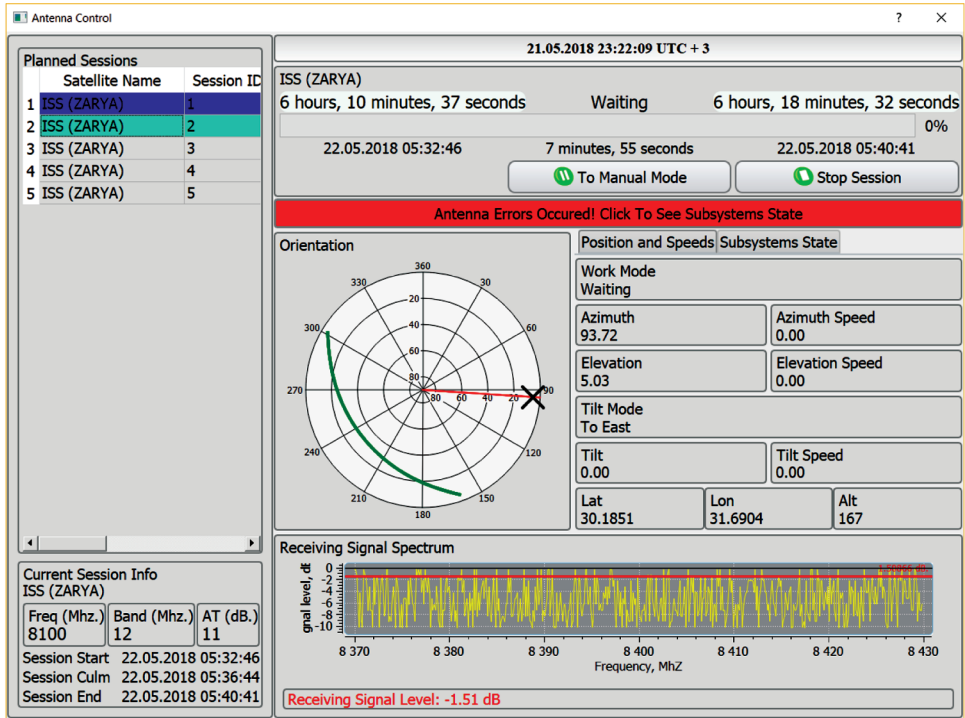


Рис. 10. Автоматическая обработка пакета сеансов. Антенна завершила сопровождение объекта и готовится к наведению на следующий объект

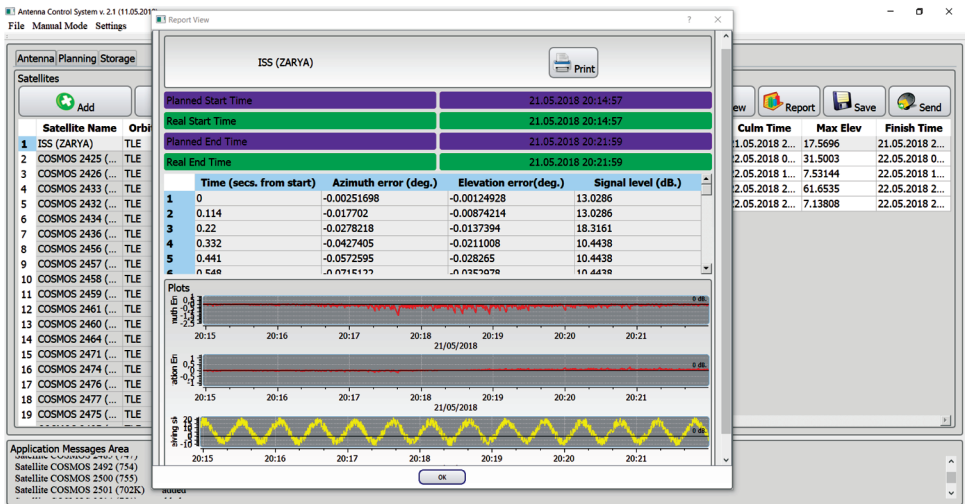


Рис. 11. Просмотр автоматически сгенерированного отчёта по проведённому сеансу. Оператор имеет возможность просмотра текстовой и графической информации, а также печати отчёта для дальнейшего использования, в том числе для целей электронного документооборота

МОДУЛЬ БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЙ ОТОБРАЖЕНИЯ

Модуль БНО (баллистико-навигационного отображения) дополняет программный комплекс функциональностью по визуализации траекторий движения целевых КА и зон радиовидимости в режиме трёхмерной сцены либо плоской карты с возможностью вывода на средства коллективного отображения. Модуль воспринимает в качестве входных данных файлы, идентичные входным данным модуля расчёта сессий. Примеры визуализации отражены на рис. 12 (плоская карта) и рис. 13 (трёхмерная сцена).

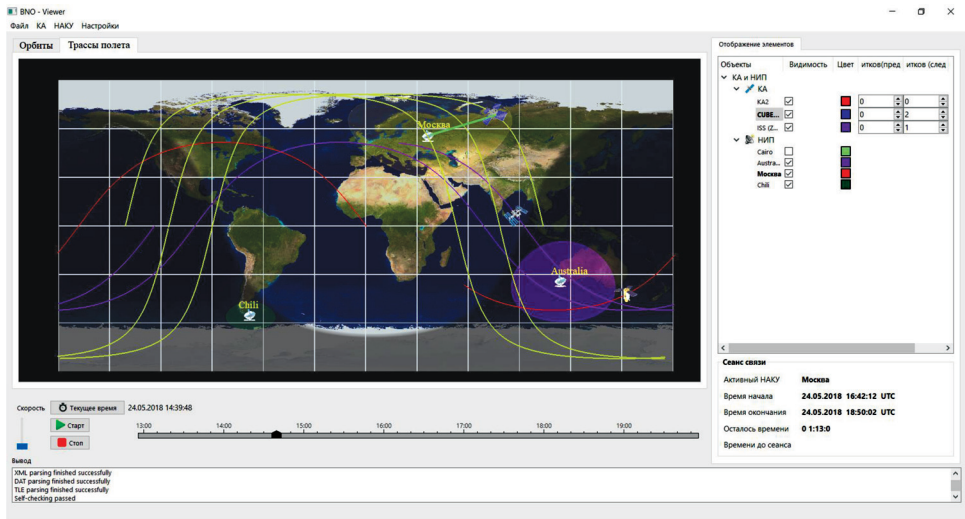


Рис. 12. Модуль моделирования БНО в режиме плоской карты

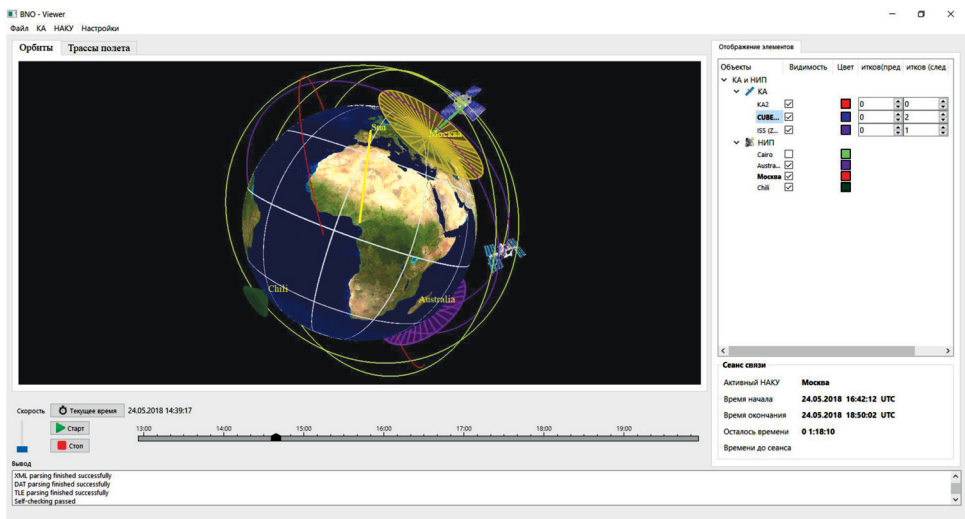


Рис. 13. Модуль моделирования БНО в режиме трёхмерного отображения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ

Таким образом, в ходе выполнения данной работы создан комплекс программных модулей, предоставляющий пользователю функциональность по расчёту углов наведения наземной антенны на космический аппарат для формирования файлов целеуказаний, используемых в дальнейшем для осуществления сеанса связи.

Программный комплекс способен функционировать как в автоматизированном режиме, осуществляя расчёт целеуказаний и передачу их на антенну по мере поступления задач на выполнение сеансов связи, так и в ручном режиме, в ходе которого пользователь с помощью стандартных элементов графического интерфейса может осуществлять изменение углов наведения, угловых скоростей антенны, а также наведение антенны на объекты с заданными полярными координатами («парковка» антенны в зенит, наведение антенны на Солнце как естественный источник радиоизлучения и т. д.).

Следует отметить, что архитектура комплекса допускает добавление новых антенных систем, новых КА и т. д., вплоть до оперативной адаптации модуля управления антенной к новым протоколам информационного взаимодействия.

Разработанные решения могут быть использованы при разработке ПО наземного сегмента новых орбитальных группировок и отдельных космических аппаратов.

SCALABLE ANTENNA AUTOMATIC CONTROL SOFTWARE COMPLEX FOR THE TERRESTRIAL SEGMENT OF THE REMOTE SENSING SATELLITES GROUP

V. V. Sazonov, M. V. Egorov, O. V. Morozov, I. D. Mukhamedjanov, S. V. Sazonova, I. A. Samylovskiy, A. S. Sapelkin

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

During this work, a set of specialized software modules to support functionality of computation and proceeding of antenna communication sessions was created. These modules allow user the opportunity to calculate the positioning angles of spacecraft or communication target w. r. t. antenna position, send them to antenna server, analyze session reports and model and visualize ballistic environment. Modules might be used to form program conveyors w.r.t. complex targets and hardware resources.

During future works, the presented program solutions can be used to develop software components for the ground segment of perspective orbital groups and individual spacecraft.

Keywords: Earth remote sensing, antenna system, communication sessions computation, automatic control

Sazonov Vasilii V. — PhD, associate Professor

Egorov Matvey V. — specialist

Morozov Oleg V. — PhD, specialist

Mukhamedjanov Ildar D. — graduate student

Sazonova Sofia V. — specialist

Samylovskiy Ivan A. — PhD, associate Professor, ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

Sapelkin Arseniy S. — specialist

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПРОВЕДЕНИЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА БОРТУ ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Д. В. Сербинов, Н. П. Семена

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),
Москва, Россия

На примере Международной космической станции анализируются внешние факторы, которые могут влиять на работу астрофизической аппаратуры, размещаемой на орбитальных станциях. Из данного анализа делается вывод о преимуществах и недостатках орбитальных космических станций как площадок для проведения астрофизических экспериментов.

Ключевые слова: астрофизический эксперимент, Международная космическая станция, факторы космического пространства

ВВЕДЕНИЕ

Условия космического пространства можно назвать враждебными не только для человека, но и для космических аппаратов. В процессе полёта космическая аппаратура подвержена воздействиям глубокого вакуума, радиации, невесомости, микрометеорных частиц, механическим нагрузкам, а также тепловым воздействиям. Все эти внешние воздействующие факторы должны быть учтены при разработке космических приборов, чтобы они сохраняли работоспособность в течение всего срока функционирования.

Самые высокие требования к условиям функционирования предъявляет астрофизическая аппаратура. Её основой является приёмник излучения, на характеристики которого могут влиять температура, радиационные условия, механические воздействия и загрязнения. При этом значимость этих факторов различна для приёмников различного типа и работающих в разных спектральных диапазонах. Также астрофизический прибор может содержать оптическую систему, которая очень чувствительна к градиентам температур и чистоте.

Астрофизические приборы размещают как на автоматических космических аппаратах, так и на долговременных орбитальных станциях. На первый взгляд, орбитальная станция как площадка для установки научной аппаратуры (особенно малогабаритной) выглядит более предпочтительно, так как станция обладает большими энергоресурсами и имеет все необходимые служебные системы. Однако условия на орбитах космических станций имеют свою специфику. В связи с этим целесообразно проанализировать возможности и ограничения, которые создаёт станция для проведения современных астрофизических экспериментов.

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТУРЫ НА БОРТУ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Все внешние воздействия на научную аппаратуру, размещённую на внешней поверхности орбитальной космической станции, можно разделить на две группы. Первая группа — это внешние воздействующие факторы естественной окружающей среды, вторая группа — факторы со стороны самой космической станции (рис. 1).

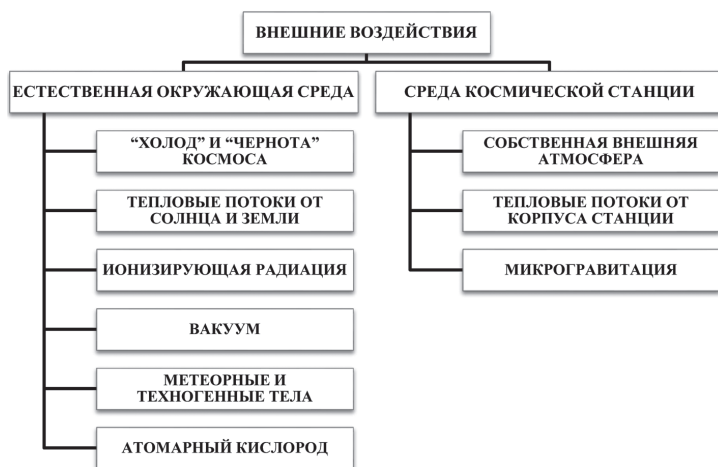


Рис. 1. Классификация внешних воздействий

Специфика внешних воздействий, представленных на рис. 1, определяется двумя факторами.

Во-первых, все долговременные орбитальные станции функционируют на низкой околоземной орбите высотой около 400 км. Этой высоте соответствуют определённые ограниченные диапазоны параметров большинства факторов космического пространства [Сербинов и др., 2018].

Во-вторых, сама космическая станция, как и любой космический аппарат, формирует локальные условия окружающей среды и внешних воздействий. Однако космическая станция, как правило, отличается достаточно большими размерами, поэтому и уровень этих воздействий относительно высокий.

Также необходимо учитывать, что условия функционирования аппаратуры на космической станции ограничены возможностями станции в ориентации, радиосвязи, энергоснабжении, используемых материалах и т.п. [Сербинов и др., 2018].

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА БОРТУ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Проблема терморегулирования может считаться наиболее значимой из всех, возникающих при размещении научных приборов на орбитальной станции. Это обусловлено тем, что тепловой режим в большей или меньшей степени

влияет на характеристики всех типов приёмников излучения и большинства типов оптических систем. При этом для современных астрофизических приборов требуется очень точная термостабилизация этих элементов в очень узком температурном диапазоне [Сербинов и др., 2018].

Проблему теплового режима можно рассмотреть на примере конкретного астрофизического прибора — Монитора Всего Неба (МВН), который разрабатывается в ИКИ РАН. МВН планируется установить на внешней поверхности Российского сегмента МКС в 2019 г. (рис. 2). Это рентгеновский монитор, оснащённый четырьмя полупроводниковыми детекторами из теллурида кадмия (CdTe). Рабочая температура детекторов составляет $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, но при этом необходимо обеспечить стабильность этой температуры на уровне $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Сербинов и др., 2018].

Проблема заключается в том, что любой прибор на поверхности орбитальной станции подвержен воздействию переменных тепловых потоков — прямого солнечного излучения, отражённого от Земли солнечного излучения и собственного инфракрасного излучения Земли. Кроме того, на прибор воздействуют трудно прогнозируемые тепловые потоки от корпуса станции, как собственные, так и отражённые солнечные. Они зависят от освещённости Солнцем и термооптических характеристик каждого элемента поверхности станции и его углового коэффициента по отношению к элементам внешней поверхности прибора. Большой размер станции делает это тепловое воздействие весьма значимым и не позволяет им пренебречь.

Переменность прямого солнечного излучения обусловлена постоянным изменением углов между направлением на Солнце и элементами поверхности прибора, а также из-за периодического захода станции в тень Земли. Периодичность этой переменности соответствует периоду орбиты и составляет около 1,5 часов.

Также следует отметить, что положение орбиты МКС относительно Солнца постоянно изменяется вследствие годового вращения Земли вокруг Солнца и прецессией орбиты МКС. Это положение определяется углом β между плоскостью орбиты и направлением на Солнце.

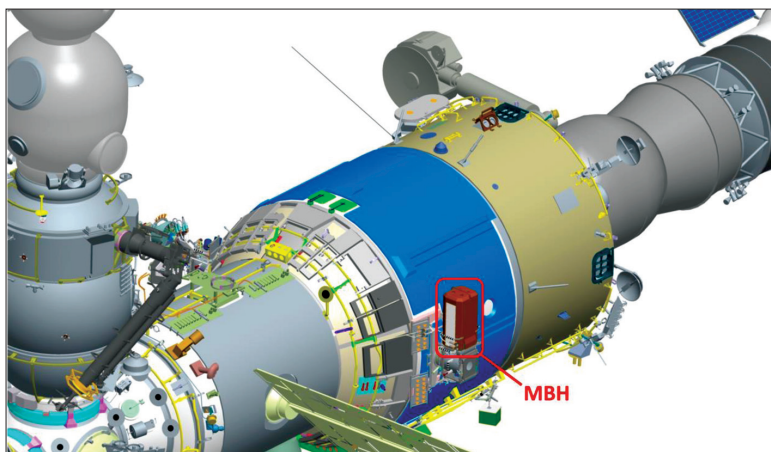


Рис. 2. МВН на Российском сегменте МКС

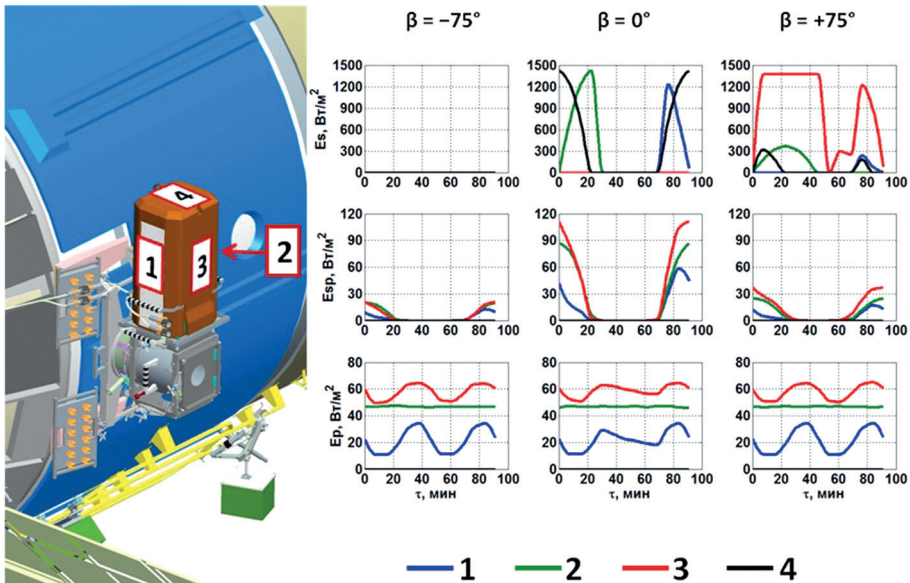


Рис. 3. Переменность падающих тепловых потоков: E_S — прямое солнечное излучение; E_{SP} — отражённое от Земли и корпуса станции солнечное излучение; E_P — собственное излучение Земли и корпуса станции

Обычно для теплового расчёта космических приборов достаточно рассмотреть три варианта положения орбиты МКС: $\beta = -75^\circ$ («холодная» орбита), $\beta = +75^\circ$ («горячая» орбита) и $\beta = 0^\circ$ (промежуточная орбита).

Сильная переменность внешних тепловых воздействий на поверхности МВН проиллюстрирована на рис. 3.

Тепловое воздействие со стороны космоса является постоянным и определяется его «холодом» и «чернотой». Как известно, радиационная температура космоса составляет около 4 К, а его степень чернота равна единице [Козлов и др., 1971].

Поддержание высокостабильной температуры элементов прибора в таких сильно переменных тепловых условиях требует создания специальной системы обеспечения теплового режима (СОТР).

Для поддержания температуры детекторов МВН с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$ прибор был оснащён СОТР на основе двух оппозитных радиаторов, соединённых двумя U-образными тепловыми трубами (рис. 4, см. с. 111). Охлаждение детекторов осуществляется с помощью термоэлектрических охладителей (элементов Пельтье), которые, как известно, имеют две стороны — тепловыделяющую (горячую) и теплопоглощающую (холодную). Кристаллы детекторов и микросхема с зарядо-чувствительным усилителем установлены на холодных сторонах, а горячие стороны прижаты к основанию блоков рентгеновских детекторов, которые установлены на полках тепловых труб. Два оппозитных радиатора позволяют лучше сглаживать колебания температуры [Сербинов и др., 2018]. Остальные поверхности прибора обшиты экранно-вакуумной теплоизоляцией, а для тепловой защиты открытой апертуры применяется лавсановая плёнка толщиной 18 мкм с алюминиевым покрытием.

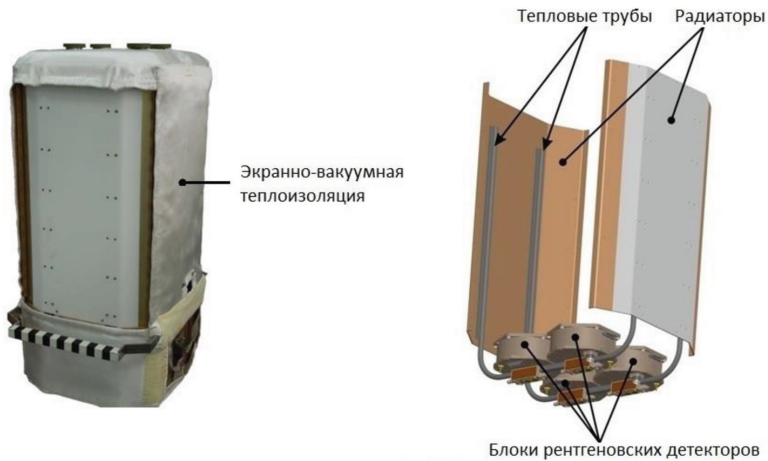


Рис. 4. Система обеспечения теплового режима МВН

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОЙ ВНЕШНЕЙ АТМОСФЕРЫ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ НА АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Одна из самых значимых проблем космической станции — загрязнения поверхности оптических элементов и детекторов астрофизических приборов компонентами собственной атмосферы станции.

Газовая среда на высоте 400 км над поверхностью Земли состоит из O_2 , N_2 , O , H , He [Козлов и др., 1971], а её давление составляет около 10^{-8} мм рт. ст. [ГОСТ 4401-81, 2004]. Такая газовая среда не должна загрязнять поверхности приборов. Однако орбитальные станции окружены собственной внешней атмосферой, которая формируется за счёт газовой выделений из конструкционных материалов, выбросов газов и жидкостей из дренажных систем, а также выбросов из сопел жидкостных ракетных двигателей ориентации и маневрирования продуктов сгорания топлива [Герасимов и др., 2011]. Величина давления атмосферы космического аппарата в прилегающем к поверхности слое может на два порядка отличаться от давления атмосферы на высотах его полёта [Беляев, 1984].

Астрофизические приборы, имеющие оптическую систему, предъявляют очень жёсткие требования к чистоте. Например, уровень молекулярного загрязнения рентгеновских зеркал для телескопа eROSITA космической обсерватории «Спектр-РГ» не должен превышать 10^{-7} г/см².

Исследования собственной внешней атмосферы МКС проводились в июле 2004 г. с использованием блока контроля давления и осаждения (БКДО), установленном на внешней поверхности модуля «Пирс». БКДО был оснащён двумя кварцевыми микровесами (КМВ1 и КМВ2). Эксперимент показал, что средняя скорость нарастания массы на КМВ1 составила $9 \cdot 10^{-12}$ г/(см²·с), а на КМВ2 — $5 \cdot 10^{-12}$ г/(см²·с) [Крылов, 2008]. Нетрудно посчитать, что за 30 дней величина осевшей массы загрязнений составит примерно $2,3 \cdot 10^{-5}$ г/см² и $1,3 \cdot 10^{-5}$ г/см² соответственно. При такой скорости осаждения загрязнений

зеркала телескопа eROSITA станут непригодными для эксплуатации через четыре часа. Хотя, конечно, реальный уровень осаждения загрязнений зависит от многих факторов, и в первую очередь от температуры источника и приёмника загрязнений, а также характеристик газовой выделенной материалов в зависимости от температуры [Сербинов и др., 2018].

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Как известно, абсолютная невесомость практически недостижима на борту космических аппаратов из-за существования различных возмущений, создающих микроускорения [Беляев, 1984]. На космической станции возникновение микроускорений связано с неоднородностью гравитационного поля в пределах станции, действием аэродинамических сил, деятельностью экипажа, колебаниями станции вокруг её центра масс и работой некоторых бортовых систем [Беляев и др., 2013]. Эти микроперегрузки являются сложной комбинацией квазипостоянных микроускорений и микровибраций. Их частотный спектр распространяется от 0,01 Гц и менее до нескольких сотен герц, а амплитудные значения изменяются от $10^{-6}g$ до $10^{-1}g$ [Анисимова и др., 2016]. Такие условия микрогравитации могут быть серьёзной проблемой для астрофизических научных приборов. Микровибрации на борту космической станции могут стать причиной возникновения микрофонного эффекта в электронной аппаратуре, который заключается в появлении шумов в измеряемом сигнале и может сильно повлиять на результаты измерений.

Проявление микрофонного эффекта в полупроводниковых детекторах изучалось на уже упомянутом приборе МВН. Спектр микровибраций задавался с помощью электродвигателя (рис. 5) [Сербинов и др., 2018].

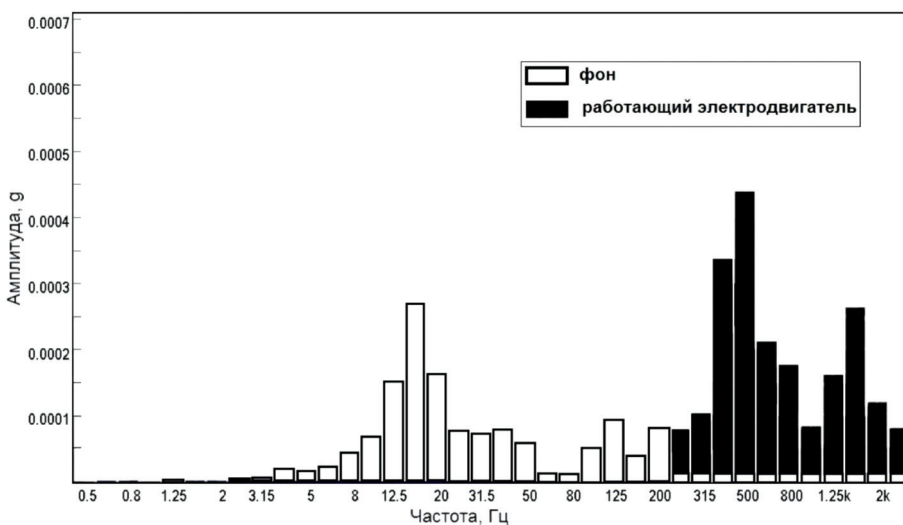


Рис. 5. Спектр микровибрации от работающего электродвигателя

Расстояние между источником микровибраций и детекторами составляло примерно 700 мм. Измерения микровибрации проводились на расстоянии примерно 200 мм от детектора. При воздействии микровибраций происходило ухудшение энергетического разрешения детектора в среднем на 24 % [Сербинов и др., 2018].

Таким образом, для научных приборов, подверженных микрофонному эффекту, требуется разработка специальных средств демпфирования вибрации.

РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА ОРБИТАХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Радиационные факторы космического пространства, к которым относятся корпускулярное и электромагнитное высокоэнергичное излучение, всегда рассматриваются как одни из самых опасных воздействий на космические аппараты. В результате радиационных воздействий могут выйти из строя отдельные электронные компоненты, могут измениться физические свойства материалов и термооптические характеристики покрытий [Козлов и др., 1971].

Низкие околоземные орбиты высотой до 500 км находятся в самой благоприятной радиационной обстановке, так как они расположены под радиационными поясами Земли. Кроме того, на таких орбитах поглощённые дозы излучения от галактических и солнечных космических лучей значительно меньше, чем за пределами магнитосферы Земли вследствие экранирующего действия самой Земли и влияния магнитного поля [Бобков и др., 1983].

Следовательно, орбитальные станции обеспечивают наиболее щадящие радиационные условия из всех возможных в космическом пространстве.

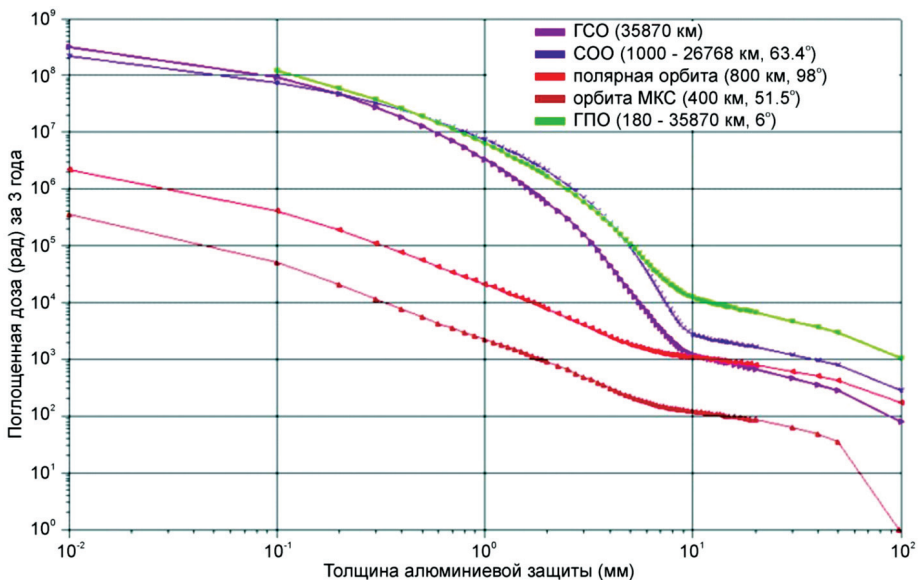


Рис. 6. Радиационные условия на разных орбитах при солнечном минимуме: ГСО — геостационарная орбита; СОО — средняя околоземная орбита; ГПО — геостационарная переходная орбита

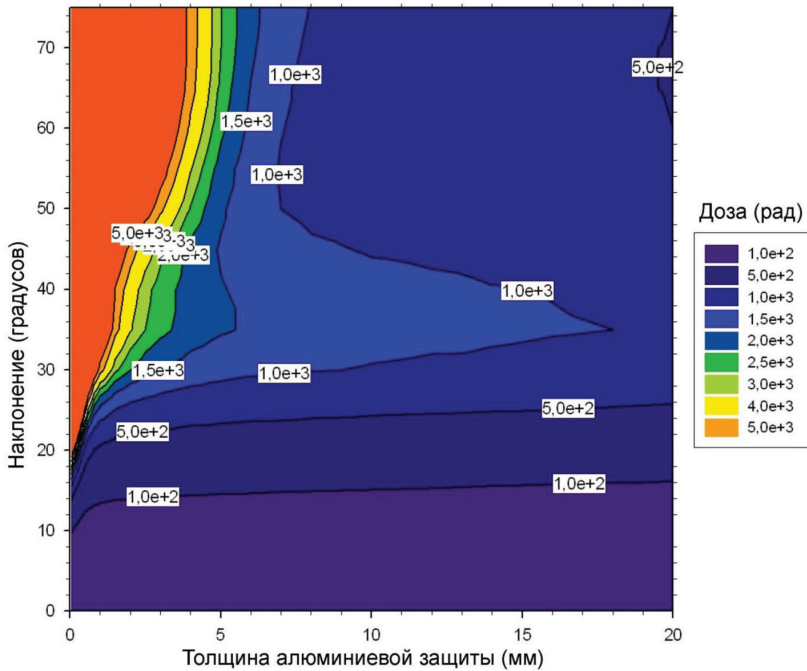


Рис. 7. Поглощённая доза за 2013–2019 гг. на орбите высотой 550 км

Однако необходимо учитывать область, известную как Южно-Атлантическая магнитная аномалия (35° ю. ш. и 325° в. д.), где внутренний радиационный пояс Земли опускается до высоты около 350 км. Орбита МКС пересекает Южно-Атлантическую магнитную аномалию, которая является серьёзной проблемой для астрофизической аппаратуры. Фактически, работа многих астрофизических приборов при пролёте этой аномалии невозможна. Высокий уровень фона заряженных частиц в областях высоких геомагнитных широт также затрудняет работу астрофизической аппаратуры. Например, прибор МВН за три года работы на МКС потеряет примерно 20 % полезного времени наблюдений из-за пролёта через область Южно-Атлантической магнитной аномалии и высокие геомагнитные широты [Ревнивцев, 2014].

Прогнозировать потоки электронов и протонов на низких околоземных орбитах можно с помощью моделей NASA AE8 и AP8 [Разработка..., 2015]. Графики радиационных условий на разных орбитах, построенные по этим моделям, приведены на рис. 6 (см. с. 113) (для солнечного минимума), а на рис. 7 представлен график поглощённой дозы для высоты 550 км при разных наклонах орбиты.

ОПАСНОСТЬ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ И КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Ещё одну опасность для научной аппаратуры могут представлять метеорные и техногенные тела. В космическом пространстве существует вероятность столкновения с метеорными телами (метеороидами) различных размеров

(от долей микрометра до нескольких метров). Но с точки зрения реальной возможности столкновений целесообразно ограничиться диапазоном размеров метеорных тел от долей микрометра до десятков микрометров. Такие частицы (с поперечными размерами менее 1 мм) принято называть микрометеороидами [Модель..., 2007]. Масса этих частиц лежит в диапазоне от 10^{-14} до 10^{-3} г. Метеороиды могут состоять из каменных пород и железоникелевых соединений с плотностью соответственно 3 и $7,8 \text{ г/см}^3$. Встречаются рыхлые микрометеорные частицы из слипшихся пылинок с плотностью $0,5 \text{ г/см}^3$ [Козлов и др., 1971]. Однако опасность состоит в том, что скорости метеорных тел относительно Земли лежат в диапазоне $10\text{--}70 \text{ км/с}$ [Модель..., 2007].

Основной ущерб от воздействия микрометеорных частиц для научных приборов заключается в эрозии оптических поверхностей и термооптических покрытий. Последнее сказывается на тепловом балансе приборов [Козлов и др., 1971]. Более существенные риски, такие, например, как сквозные пробоины в корпусе прибора можно не рассматривать, поскольку они создаются частицами размером более $0,5\text{--}1 \text{ см}$ [Модель..., 2007], вероятность столкновений с которыми крайне мала.

Чтобы оценить влияние метеороидной среды на космический аппарат, необходимо знать распределение потоков метеороидов на орбите аппарата с учётом их массы, скоростей и т.д. В настоящее время разработано достаточно много моделей метеороидной среды. Применительно к орбите МКС используется модель спорадической метеорной среды NASA SSP 30425, которая учитывает метеороиды массой $10^{-15} \leq m \leq 10 \text{ г}$ и может применяться на расстояниях от Солнца $\sim 1 \text{ а. е.}$ [Space..., 1994].

Используя распределение плотности потока метеороидов по массам согласно модели NASA SSP 30425, можно оценить долю повреждённой площади S_d бомбардируемой поверхности в зависимости от времени t . Для этого необходимо учитывать, что модель NASA SSP 30425 даёт распределение плотности потоков метеороидов F для массы $\geq m$. Согласно [Сербинов и др., 2018] S_d рассчитывается по формуле:

$$S_d = t \sum_{n=-15}^1 \left[S_F G_E \left(F(m \geq 10^n) - F(m \geq 10^{n+1}) \right) \pi (k \rho^\alpha v^\beta)^2 \left(\frac{3 \times 10^n}{4 \pi \rho} \right)^{2/3} \right] \times 100 \%,$$

где S_F , G_E — коэффициенты, учитывающие высоту орбиты (рассчитываются по формулам из SSP 30425); v , ρ — скорость и плотность частицы соответственно; $k = 0,3\text{--}0,6$; $\alpha = 1/3\text{--}1/2$; $\beta \approx 2/3$.

Также следует учитывать, что данная модель метеороидной среды предполагает плотность метеороидов $\rho = 2 \text{ г/см}^3$ при $m < 10^{-6} \text{ г}$, $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ при $10^{-6} \leq m \leq 10^{-2} \text{ г}$ и $\rho = 0,5 \text{ г/см}^3$ при $m > 10^{-2} \text{ г}$, а средняя скорость метеороидов относительно космического аппарата составляет 19 км/с .

На рис. 8 приведены значения доли повреждённой площади для орбиты МКС и геостационарной орбиты (ГСО).

Как видно на рис. 8, метеорные тела на орбите МКС представляют немного больше опасности, чем на ГСО, однако в обоих случаях эта опасность пренебрежимо мала.

В дополнение к естественной микрометеорной среде в космосе присутствует и космический мусор искусственного происхождения, состоящий из

частиц пыли оксида алюминия (выбросов твёрдого топлива), крышек инструментов, гаек и болтов, разгонных блоков ракет и т.д. Их диаметр варьируется от 0,001 мм до 10 м. Их средняя плотность примерно равна плотности алюминиевых сплавов — около 2,8 г/см³ [Разработка..., 2015]. Оценку потока техногенного вещества на низких околоземных орбитах можно произвести согласно ГОСТ Р 25645.167-2005 [ГОСТ Р 25645.167-2005, 2005]. Например, на рис. 9 приведены графики среднего числа столкновений космического аппарата сферической формы диаметром 1 м с техногенными частицами за 2019–2022 гг. в зависимости от высоты орбиты наклоном 55° (по данным ГОСТ [ГОСТ Р 25645.167-2005, 2005]).

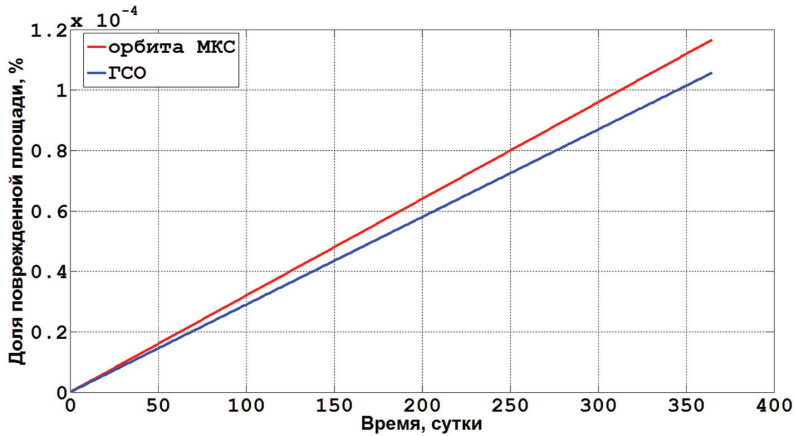


Рис. 8. Оценка повреждения поверхности от попадания метеороидов

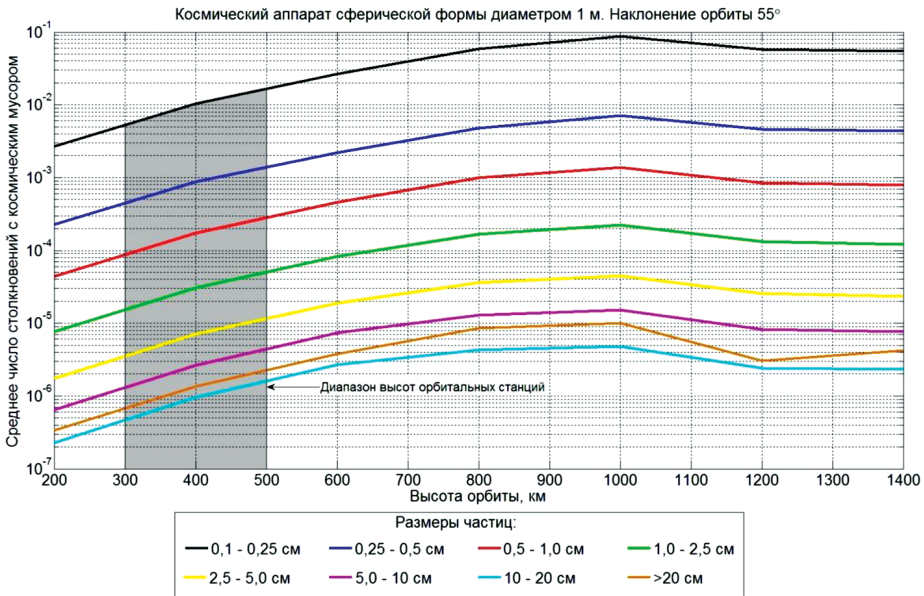


Рис. 9. Число столкновений с космическим мусором за 2019–2022 гг.

Графики на рис. 8 и 9 наглядно показывают, что опасность повреждения астрофизических приборов на космических станциях от попадания метеорных и техногенных тел пренебрежимо мала и не требует принятия каких-то специальных мер по их защите.

ВОЗДЕЙСТВИЕ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА

Одна из особенностей низких околоземных орбит — это наличие следов атмосферы, и особенно атомарного кислорода (АК), который является доминирующим компонентом атмосферы Земли на высотах около 200–700 км. Атомарный кислород обладает высокой химической активностью, которая усилена кинетической энергией сталкивающихся с поверхностью атомов (около 5 эВ), обусловленной орбитальной скоростью космического аппарата. Атомарный кислород может оказывать значительное повреждающее воздействие на материалы внешней поверхности низкоорбитальных космических аппаратов, могут изменяться механические, оптические и электрофизические свойства материалов. Концентрация атомарного кислорода сильно зависит от уровня солнечной активности.

Ориентировочно можно считать, что при среднем уровне солнечной активности годовой флюенс атомарного кислорода в диапазоне высот 200–1000 км составляет от 10^{23} до 10^{18} см^{-2} [Модель..., 2007]. Ряд металлических материалов, в первую очередь Ag, Os, а также графит и углеродные материалы, подвержены сильному окислению и эрозии [Акишин, 2006]. Но в наибольшей степени подвержены разрушающему воздействию атомарного кислорода полимерные материалы [Модель..., 2007]. Например, лавсановая плёнка, используемая для тепловой защиты открытой апертуры прибора МВН, при толщине 18 мкм прослужит чуть больше одного года (рис. 10).

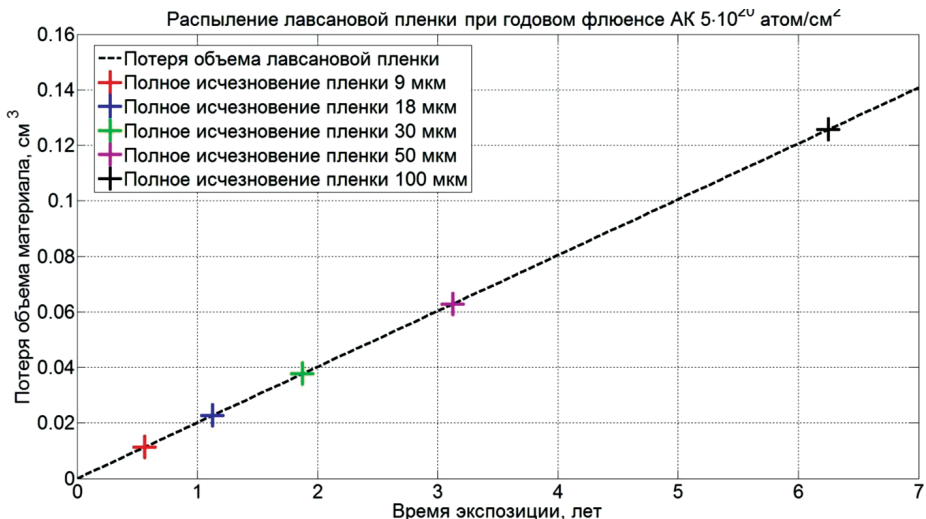


Рис. 10. Распыление лавсановой плёнки разной толщины от воздействия атомарного кислорода

Однако алюминиевое покрытие этой плёнки является эффективной защитой от разрушающего воздействия АК, так как на поверхности алюминия образуется окисная плёнка достаточной плотности, которая не растрескивается и не отслаивается от материала, защищая его от разрушения [Модель..., 2007].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космические орбитальные станции как площадки для проведения астрофизических экспериментов обладают как преимуществами, так и недостатками. К их преимуществам можно отнести возможность использовать приборы без служебных систем и размещать часть аппаратуры в комфортных условиях гермоотсека. Но самым существенным преимуществом является низкий радиационный фон на орбитах таких станций. Это не только повышает надёжность и время работы аппаратуры, но и позволяет исследовать низкоуровневые явления в рентгеновском диапазоне спектра [Сербинов и др., 2018].

Главной проблемой орбитальных станций является необходимость нейтрализации сильно переменных внешних тепловых условий при использовании приёмников излучения и оптических систем, требующих точной термостабилизации [Сербинов и др., 2018].

Второй по значимости проблемой является достаточно быстрое загрязнение оптических поверхностей элементами собственной атмосферы станции. Например, незащищённое рентгеновское зеркало косоугольного падения при размещении на внешней поверхности МКС потеряет свою отражающую способность за несколько часов. Это требует либо отказа от использования высококачественной оптики, либо защиты её от загрязнения [Сербинов и др., 2018].

Также к недостаткам орбитальных станций следует отнести и несоответствие параметров ориентации требованиям со стороны современных астрофизических приборов [Сербинов и др., 2018].

ЛИТЕРАТУРА

- [Акишин, 2006] *Акишин А. И.* Воздействие атомарного кислорода на космические материалы: Перспективные материалы. 2006. № 6. С. 15–22.
- [Анисимова и др., 2016] *Анисимова Е. В., Беляев М. Ю., Волков О. Н., Обьеденников С. С.* Контроль микроускорений на МКС при проведении экспериментов, чувствительных к микроперегрузкам // Труды Л чтений, посвящённых разработке научного наследия идей К. Э. Циолковского: материалы докл. 2016. С. 122–129.
- [Беляев и др., 2013] *Беляев М. Ю., Волков О. Н., Рябуха С. Б.* Микровозмущения на Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2013. № 3. С. 14–24.
- [Беляев, 1984] *Беляев М. Ю.* Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
- [Бобков и др., 1983] *Бобков В. Н., Васильев В. В.* и др. Космические аппараты / под общей ред. проф. К. П. Феоктистова. М.: Военное изд-во, 1983. 320 с.
- [Герасимов и др., 2011] *Герасимов Ю. И., Крылов А. Н., Куриленок А. О., Мишина Л. В., Намов С. Ф., Приходько В. Г., Соколова С. П., Ярыгин В. Н., Ярыгин И. В.* Результаты исследований влияния загрязнений от СВА на характеристики конструкционных

- материалов и терморегулирующих покрытий кораблей и модулей МКС // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 12. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2011-12/articles/349/>.
- [ГОСТ 4401-81, 2004] ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М., 2004.
- [ГОСТ Р 25645.167-2005, 2005] ГОСТ Р 25645.167-2005. Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения потоков техногенного вещества в космическом пространстве. М., 2005.
- [Козлов и др., 1971] *Козлов Л. В., Нусинов М. Д., Акишин А. И., Залетаев В. М., Козелкин В. В., Евланов Е. Н.* Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / под ред. акад. Г. И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
- [Крылов, 2008] *Крылов А. Н.* Исследование динамики загрязнений в собственной внешней атмосфере орбитальных станций // Химическая физика. 2008. Т. 27. № 10. С. 77–83.
- [Модель..., 2007] Модель космоса: Научно-информационное издание. В 2 т. / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
- [Разработка..., 2015] Разработка систем космических аппаратов / под ред. П. Форте-скую, Г. Суайнерда, Д. Старка; пер. с англ. М.: Альпина Паблшер, 2015. 764 с.
- [Ревнивцев, 2014] *Ревнивцев М. Г.* Измерения космического рентгеновского фона Вселенной и эксперимент МВН // Письма в Астрономич. журн.: Астрономия и космическая астрофизика. 2014. Т. 40. № 11. С. 735–760.
- [Сербинов и др., 2018] *Сербинов Д. В., Семена Н. П., Павлинский М. Н., Арефьев В. А.* Возможности и ограничения орбитальных космических станций для проведения астрофизических экспериментов // Инженерная физика. 2018. № 4. С. 33–48.
- [Space..., 1994] Space Station Program Natural Environment Definition for Design. SSP 30425 Revision B. February 8, 1994. URL: http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP-30425B_29660/ (дата обращения 21.09.2017 г.).

THE INFLUENCE OF SPACE FACTORS ON THE CONDUCT OF ASTROPHYSICAL EXPERIMENTS ON BOARD ORBITAL STATIONS

D. V. Serbinov, N. P. Semena

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow, Russia

On the example of the International Space Station (ISS), external factors that can affect the operation of astrophysical equipment placed at orbital stations are analyzed. From this analysis, a conclusion about the advantages and disadvantages of orbital space stations as sites for conducting astrophysical experiments is made.

Keywords: astrophysical experiment; International Space Station; factors of outer space.

Serbinov Dmitry V. — junior researcher

Semena Nikolay P. — head of the laboratory, PhD

О ВЗАИМОСВЯЗИ ОКОЛОЗЕМНЫХ АСТЕРОИДОВ С КОМЕТНО-МЕТЕОРОИДНЫМ КОМПЛЕКСОМ

М. В. Сергиенко, М. Г. Соколова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Татарстан, Россия

По данным Центра метеорных данных Международного астрономического союза для порядка 80 наблюдаемых в околоземном пространстве метеорных потоков не найдено кометное родительское тело. В работе группы астероидов Атоны, Аполлоны, Амуры, Атиры рассмотрены с точки зрения их возможной связи с кометно-метеороидным комплексом. Исходная база астероидов составила 17 800 орбит [http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi]. На основе статистического и робастного анализов таких параметров как размеры и химико-минералогический состав астероидов, эксцентриситетов орбит и постоянная Тиссерана было установлено, что астероиды, входящие в группу Аполлоны и Амуры, могут содержать среди своих членов ядра потухших комет или продукты их распада и могут являться вероятными родительскими телами наблюдаемых метеорных потоков-сирот.

Ключевые слова: метеороид, метеор, метеорный поток, астероид, малые тела Солнечной системы, кометно-метеороидный комплекс, постоянная Тиссерана

В настоящее время большой интерес вызывают околоземные объекты (ОЗО, Near Earth Objects — NEO) — малые тела Солнечной системы, астероиды и кометы, имеющие вытянутые орбиты и перигелийное расстояние не более 1.3 а.е. При своём движении вокруг Солнца ОЗО периодически сближаются с Землёй, неся для нее угрозу столкновения. На сегодня открыто более 15 тыс. ОЗО и этот список постоянно пополняется. Анализ орбит ОЗО показывает, что большая их часть образована в главном поясе астероидов, который расположен между орбитами Марса и Юпитера. Минералогический состав большинства наблюдаемых астероидов — это каменные или железокаменные тела, не исключается возможность, что некоторые из ОЗО являются ядрами угасших комет семейства Юпитера [Артемова и др., 2010]. Гипотеза генетической связи метеороидных роёв с астероидами в настоящее время рассматривается в контексте астероид как потухшая комета, в прошлом породившая метеороидный рой. Поэтому актуальными являются вопросы изучения связей ОЗО с кометно-метеороидным комплексом.

Поиск связей метеорных потоков с астероидами осуществляется с астероидами, пересекающими орбиту Земли (АСЗ), Атонами, Аполлонами, Амурами и Атирами, которые классифицируют по значениям больших полуосей и перигелийных расстояний (табл. 1).

Данные группы астероидов были рассмотрены с точки зрения их потенциальной возможности разрушаться и/или содержать ядра потухших комет по таким физико-химическим параметрам как плотность астероидов и их диаметр, а также орбитальные параметры. Анализ распределений астероидов по данным параметрам в группах проводилось на основе робастного и статистического анализов. Для того чтобы учесть разное число астероидов в группах Атоны,

Сергиенко Мария Викторовна — аспирант, maria_sergienko@mail.ru

Соколова Марина Геннадьевна — доцент, кандидат физико-математических наук, smarina.63@mail.ru

Аполлоны, Амуры и Атиры вследствие их наблюдательной селекции, применён робастный анализ. Путём группирования данных по выборкам на определённых условиях робастный анализ позволяет ограничить влияние неоднородностей различных групп данных, либо вовсе их исключить. Совместное применение робастного и статистического анализов повышают достоверность полученных результатов, особенно в условиях недостаточной статистики исходных данных.

Таблица 1. Число открытых АСЗ (по данным [Артемьева и др., 2010], дата обращения 17.03.2018)

Группа	Тип орбиты	Всего открыто	Занумеровано	Потенциально опасные	Занумеровано
Атиры	$Q < 0,983$ а.е., сближение с Землёй в афелии орбиты АСЗ	17	6	6	2
Атоны	$Q > 0,983$ а.е., $a < 1$ а.е., пересечение с Землёй в её перигелии орбиты	1318	216	169	88
Аполлоны	$q < 1,017$ а.е., $a > 1$ а.е., пересечение с Землёй в перигелии орбиты АСЗ	9748	1339	1598	572
Амуры	$1,017 < q < 1,3$ а.е., сближение с Землёй в перигелии орбиты АСЗ	6778	1074	118	31

Одним из способов установления возможной генетической связи является сравнение химико-минералогического состава астероидов, наблюдаемых метеороидов и выпавших на Землю метеоритов и комет. Однако в настоящее время в основном определяется лишь принадлежность астероида к определённому спектральному классу по классификации *SMASS*, предложенной в 2002 г. [Бережной и др., 2009]. Астероиды распределяются по трём большим классам *C*, *S* и *X*. Группа углеродных астероидов (*C*-группа) — углеродные объекты, имеющие слабую прочность материала. Согласно работе [Standish, Williams, 2006], астероиды *C*-группы имеют плотность $1,8 \text{ г/см}^3$. Группа кремниевых астероидов (*S*-группа) — силикатные (каменные) объекты, более прочные в сравнении с группой *C*, их плотность $2,4 \text{ г/см}^3$ [Standish, Williams, 2006]. Группа железных астероидов (*X*-группа) имеет высокое содержание с самыми прочными механическими свойствами, устойчивы к высоким температурам и имеющие плотность $5,0 \text{ г/см}^3$ [Standish, Williams, 2006]. Статистика определения химико-минералогического состава астероидов на сегодня очень низкая (табл. 2). Для групп Атоны, Аполлоны, Амуры этот показатель не превышает 2 % от общего числа открытых в них астероидов, и ни для одного Атира химический состав пока не определён. Это не позволяет выполнить робастный и статистический анализ распределений астероидов по их плотности.

По данным табл. 2, можно лишь отметить, что Амуры и Аполлоны преимущественно относятся к слабопрочным астероидам (*S*-группа), больше всего металлических объектов (*X*-группа) у Атонов.

С точки зрения разрушения астероидов особый интерес представляют группы АСЗ, популяции которых насыщены астероидами небольших размеров, т.е. могут быть продуктами распада, или содержат типичные для комет

астероиды километровых размеров. Однако размеры известны не для всех пронумерованных астероидов, например, также отсутствуют данные о размерах всех Атиров. Для других групп это показатель не превышает 7 % от общего числа открытых в них астероидов (см. табл. 2). Распределение астероидов по диаметрам в каждой группе показано на рис. 1 (гистограммы — статистический анализ; сплошная линия — робастный анализ; по вертикальной оси отложена частота как отношение числа астероидов с известными параметрами к числу всех астероидов в группе; по горизонтальной оси — диаметр, км). В группе Атонов соотношение астероидов разных размеров примерно одинаковое, а размеры не превышают 3 км. Аполлоны и Амуры имеют крупные астероиды в поперечнике более 5 км. Распределение астероидов по размерам в группе Амуров носит случайный характер, а вот для Аполлонов наблюдается почти экспоненциальная зависимость увеличения числа астероидов с уменьшением их диаметра, что может быть результатом их дробления.

Таблица 2. Статистика астероидов АСЗ по диаметру и спектральному типу (по данным [Артемьева и др., 2010], дата обращения 17.03.2018)

Группа астероидов	Всего	Количество определённых по диаметру	Количество определённых по спектральному классу (SMASSII)
Атиры	17	0 (0 %)	0 (0 %)
Атоны	1322	96 (7 %)	27 (2 %)
Аполлоны	9776	482 (5 %)	157 (2 %)
Амуры	6795	270 (4 %)	129 (2 %)

Наклоны орбиты комет и астероидов к эклиптике меняются в достаточно широких пределах, но астероиды имеют более круговые орбиты. Поэтому для каждой группы астероидов построены распределения по эксцентриситету орбиты e (рис. 2, гистограммы — статистический анализ; сплошная линия — робастный анализ; по вертикальной оси отложена частота как отношение числа астероидов в группе к общему числу астероидов всех групп; по горизонтальной оси — эксцентриситет орбиты).

Сравнение по форме орбиты показывает, что большая часть астероидов с сильно вытянутыми кометопоподобными орбитами (e пределах 0,6–0,8) и близкими к параболическим (e в пределах 0,8–1,0) принадлежит группам Атиры и Аполлоны. Орбиты Атонов и Амуров менее вытянутые, к тому же имеют малую долю почти параболических орбит. Таким образом, по совокупности всех исследованных нами параметров выделяется группа Аполлонов, члены которой в большей степени могут содержать ядра потухших комет и быть связанными с метеорными потоками-сиротами.

Для проверки данного вывода используем постоянную Тиссерана T , которая является следствием решения ограниченной задачи трёх тел: Солнце — Юпитер — астероид, при этом масса астероида принимается за бесконечно малую величину:

$$T = \frac{5,203}{a} + 2\sqrt{(1-e^2)\left(\frac{a}{5,203}\right)} \cdot \cos(i) \cdot \cos(i_{10}) - \sin(i) \cdot \sin(i_{10}) \cdot \cos(\Omega - \Omega_{10}).$$

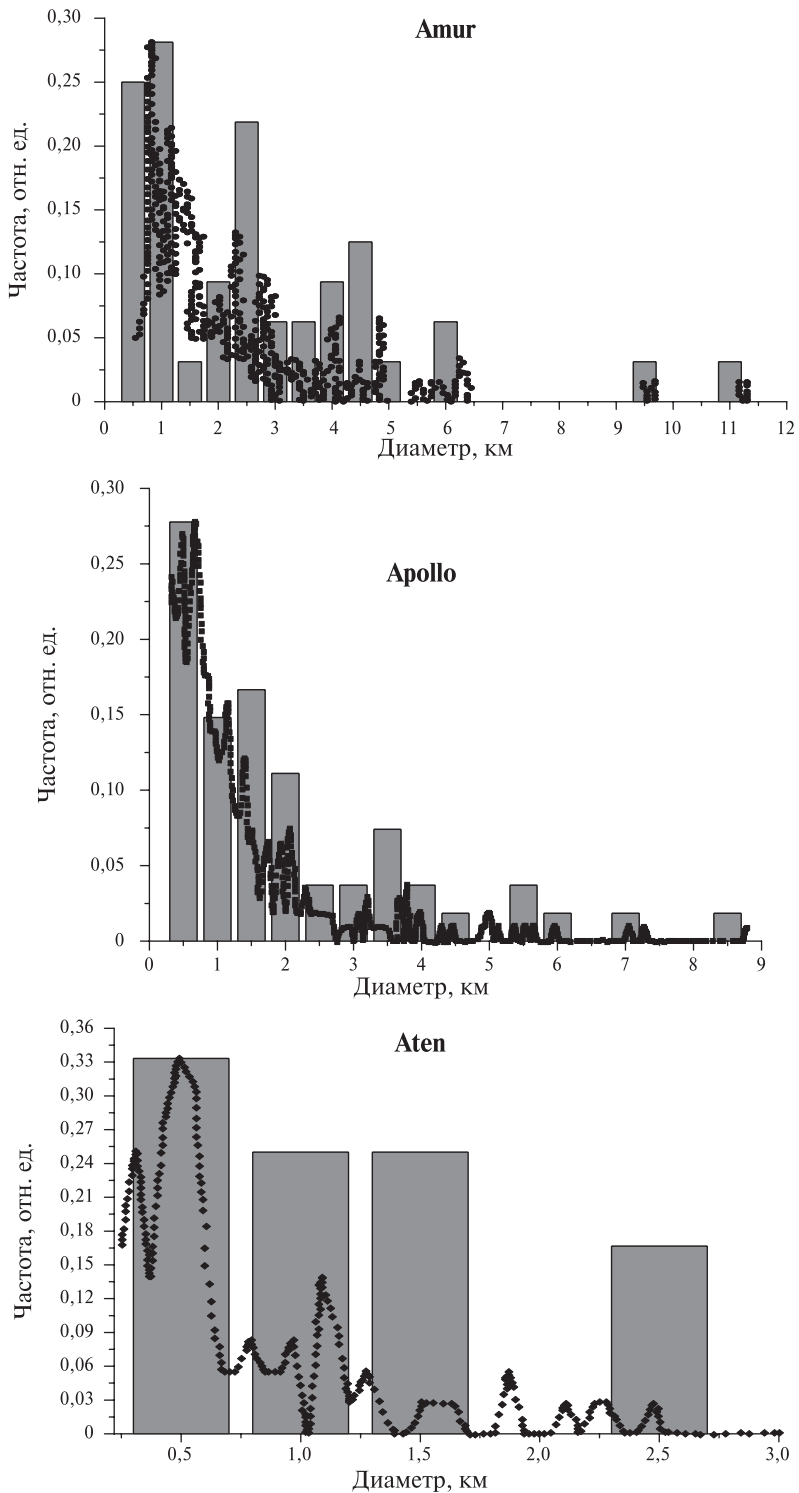


Рис. 1. Распределение астероидов в группах по диаметру (км)

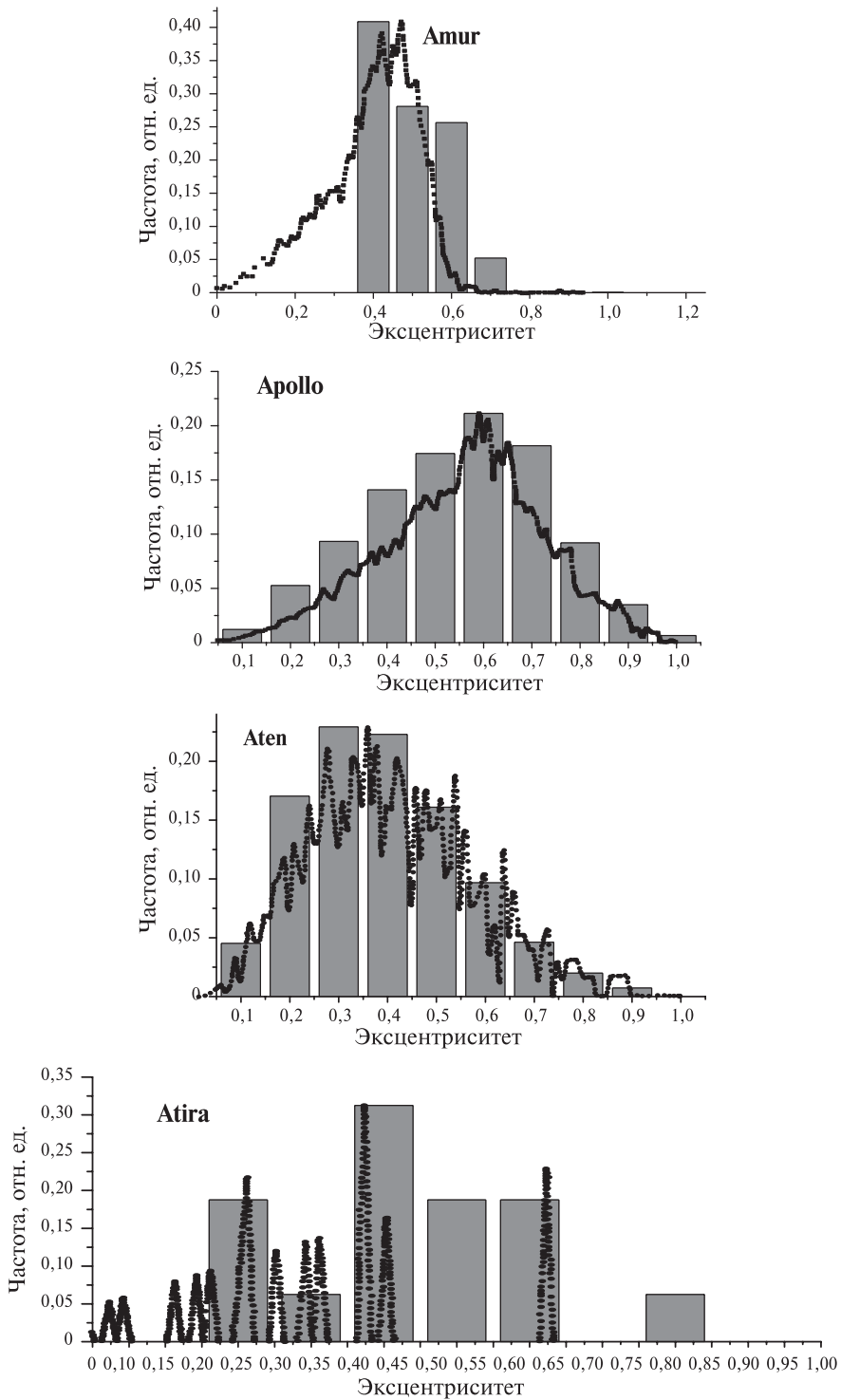


Рис. 2. Распределение астероидов в группах по эксцентриситету

Принимают, что объекты с $T < 3,1$ движутся по кометоподобным орбитам, с $T > 3,1$ — по астероидным, объекты с $T \sim 3$ имеют двойственную природу [Jewitt, 2012]. Статистические распределения астероидов в группах по постоянной Тиссерана представлены на рис. 3 (по вертикальной оси отложена частота как отношение числа астероидов в группе к общему числу астероидов всех групп; по горизонтальной оси — значения постоянной Тиссерана). Таким образом, по значению постоянной Тиссерана группы Атоны и Атиры относятся к астероидному типу. В то время как Аполлоны и Амуры имеют в своих группах объекты, значение постоянной Тиссерана которых ниже значения 3,1, и объекты двойственной природы, которые, вероятно, могут быть ядрами потухших комет.

Не противоречат полученным выводам и данные Центра метеорных данных Международного астрономического союза [<http://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2007/>] о возможной генетической связи астероидов с наблюдаемыми метеорными потоками-сиротами (табл. 3). В табл. 3 дано название наблюдаемого метеорного потока, название астероида по каталогу Центра малых планет [Артемьева и др., 2010], его принадлежность к группе, эксцентриситет (e) его орбиты и диаметр (D), постоянная Тиссерана (T), абсолютная звёздная величина (H), расстояние минимального сближения с Землёй (r).

Таблица 3. Метеорные потоки и астероиды, генетически связанные с ними (по данным [<http://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2007/>], дата обращения 17.05.2018)

Метеорный поток	Астероид	Группа	e	D , км	T	H	r , а. е.
Корвиды	2004 HW	Аполлон	0,64	—	3,04	17,10	0,01
Северные Тауриды	2004 TG10	«	0,86	1,32	2,99	19,40	0,02
Геминиды	3200 Phaethon	«	0,89	5,10	4,51	14,60	0,02
Квадрантиды	2003 EH1	Амур	0,62	—	2,07	16,20	0,21
Виргиниды	1998 SH2?	Аполлон	0,72	—	2,91	20,80	0,02
Северные δ -Канкриды	1991 AQ?	«	0,78	1,1	3,16	17,10	0,02
Южные δ -Канкриды	2001 YB5?	«	0,86	—	2,90	20,90	0,00
Дневные κ -Аквариды	2002 EV11?	«	0,80	—	3,04	20,00	0,05
Южные χ -Ориониды	2002 XM35?	«	0,84	—	2,96	22,96	0,02
Дневные Сектантиды	2005 UD	«	0,87	—	4,51	17,30	0,08
Дневные апрельские Писциды	2005 NZ6?	«	0,86	1,99	3,43	17,4	0,01

Как видим, все астероиды, представленные в табл. 3, относятся к группам Аполлоны и Амуры, при этом их орбиты достаточно вытянуты, эксцентриситеты больше значения 0,6. К сожалению, данные о размерах большинства указанных астероидов не известны. Спектральный класс также известен пока только для астероида Фаэтон (3200 *Phaethon*) и относится к углеродному типу C, а его размер является типичным для кометных ядер. К тому же метеорный поток Геминид проявляет все признаки потока кометного происхождения [Соколова, Сергиенко, 2016], что позволяет предположить кометное происхождение Фаэтона.

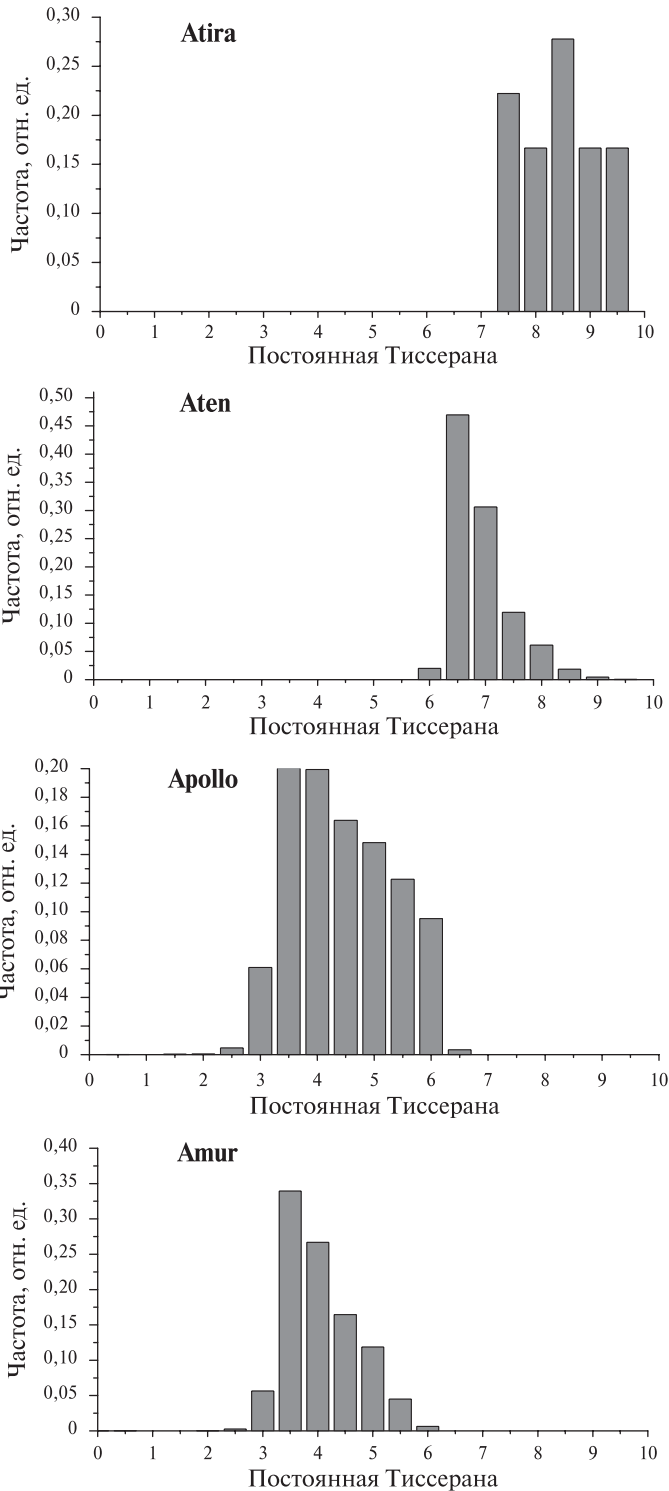


Рис. 3. Распределение астероидов в группах по постоянной Тиссерана

Таким образом, анализ физико-химических и орбитальных параметров выделяет группы Аполлонов и Амуров, как наиболее вероятных кандидатов для поиска кометного родительского тела среди астероидов для наблюдаемых метеорных потоков-сирот. Изучение физико-динамических свойств астероидов имеет огромное значение для установления природы взаимосвязей малых тел Солнечной системы, механизма их миграции в околоземное пространство и, кроме того, способствует развитию системы предупреждения и парирования астероидно-кометной опасности.

ЛИТЕРАТУРА

- [Артемьева и др., 2010] *Артемьева Н. А., Баканас Е. С., Барабанов С. И.* и др. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Шустова Б. М., Рыжковой Л. В. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
- [Бережной и др., 2009] *Бережной А. А., Бусарев В. В., Ксанфомалити Л. В., Сурдин В. Г., Холшевников К. В.* Солнечная система. М.: Физматлит, 2009. 400 с.
- [Соколова, Сергиенко, 2016] *Соколова М. Г., Сергиенко М. В.* Сравнение структур метеорных потоков кометного и предположительно астероидного происхождения // *Астрон. вестн.* 2016. Т. 50. № 6. С. 401–411.
- [Jewitt, 2012] *Jewitt D. C.* The active asteroids // *Astronomical J.* 2012. V. 143. No. 3.
- [Standish, Williams, 2006] *Standish E. M., Williams J. C.* Orbital Ephemerides of the Sun, Moon, and Planets: Ch. 5 // *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* / eds. S. Urban, P. K. Seidelmann. Sausalito, California: Univ. Sci. Books, 2006. P. 279–324.

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN NEAR-EARTH ASTEROIDS AND THE COMET-METEOROID COMPLEX

M. V. Sergienko, M. G. Sokolova

Kazan Federal University, Kazan, Tatarstan, Russia

According to the Meteor Data Center of the International Astronomical Union, no cometary parent body was found for about 80 meteor streams observed in the near-Earth space. In the work of the group of asteroids Aton, Apollo, Amur, Atir are considered from the point of view of their possible connection with the comet-meteoroid complex. The initial base of asteroids was 17,800 orbits [http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi]. On the basis of statistical and robust analyzes of such parameters as the size and chemical-mineralogical composition of asteroids, eccentricities of orbits and the Tisserand constant, it was established that asteroids belonging to the Apollo and Amurs group may contain among their nuclear members extinct comets or their decay products and probable parental bodies of observed meteor streams-orphans.

Keywords: meteoroid, meteor, meteor shower, asteroid, small bodies of the Solar system, cometary-meteoroid complex, Tisserand constant

Sergienko Maria Viktorovna — post-graduate, maria_sergienko@mail.ru
Sokolova Marina Gennadevna — PhD, smarina.63@mail.ru

ДЖЕТ В ДЖЕТЕ В ГАЛАКТИКЕ М87

Д. Н. Собьянин

Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
отдел теоретической физики им. И. Е. Тамма, Москва, Россия

Новейшие наблюдения знаменитого джета в радиогалактике М87 на частоте 15 ГГц с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой демонстрируют существование устойчивой трёхгорбой структуры поперечного профиля с ненаблюдавшимся ранее сверхузким центральным пиком. Эта радиоструктура может отражать действительную структуру джета, который на самом деле состоит из двух вложенных соосных джетов. Разработана релятивистская магнитогидродинамическая модель, в которой внутренний джет помещён в полый внешний джет, и вычислены соответствующие электромагнитные поля, давления и иные физические величины. Джет как целое подключён к центральной машине, которая генерирует напряжение между внешним и внутренним джетами, отвечающее за одинаковые наблюдаемые законы их расширения. Структура «джет в джете» может свидетельствовать об одновременной работе двух различных механизмов запуска джета, один из которых связан с центральной чёрной дырой, а другой — с аккреционным диском. Полученное магнитное поле 80 Гс на основании достаточно для обеспечения наблюдаемой светимости джета.

Ключевые слова: джеты, галактики, М87

ВВЕДЕНИЕ

Радиогалактика М87 — это близкая доминирующая эллиптическая галактика в скоплении Девы, содержащая первый открытый внегалактический джет. Это одна из наиболее близких радиогалактик, расстояние до которой составляет всего лишь около 16 Мпк. Наблюдаемый релятивистский джет поддерживается сверхмассивной чёрной дырой, масса которой составляет от 3 до 6 млрд солнечных масс. Близость галактики М87 способствует детальному исследованию её активности, проявляющейся во всём спектре частот от радио- до гамма-излучения сверхвысоких энергий. Таким образом, джет в галактике М87 является хорошим кандидатом для расширения наших знаний о физических процессах, происходящих в центральной машине активного галактического ядра.

Интерес к теоретическому изучению релятивистских джетов возник после первых работ, посвящённых исследованию выделения энергии чёрной дырой и происхождения джетов. В настоящее время этот интерес всё более возрастает, так как необходимо надёжно установить природу джетов и механизм их запуска, коллимации, стабилизации и распространения во внешней среде. По тем же причинам значительная роль отводится наблюдательным исследованиям с высоким разрешением, которые могут прояснить некоторые ключевые особенности внутренней структуры джета. Благодаря яркости и близости джета в галактике М87 в наблюдениях с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами удалось достичь беспрецедентно высокого углового разрешения на уровне 50 угловых микросекунд, что соответствует всего лишь 6–10 радиусам Шварцшильда чёрной дыры.

Собьянин Денис Николаевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, sobyanin@lpi.ru

Предыдущие исследования говорят о том, что джет в галактике M87 обладает практически параболической структурой на относительно малых расстояниях от основания, не превышающих 100 тыс. радиусов Шварцшильда, характеризуется поперечным профилем с краевым уярчением на различных частотах и поэтому может рассматриваться, например, в рамках модели магнитогидродинамического сопла. Однако новые радионаблюдения M87 на частоте 15 ГГц (2 см) с использованием антенной решётки со сверхдлинными базами и сверхбольшой антенной решётки Y27 Национальной радиоастрономической обсерватории США показывают существование устойчивой трёхгорбой структуры поперёк джета [Hada, 2017]. Более того, обнаружение в этих наблюдениях сверхузкого центрального пика делает проблематичным объяснение эффекта с помощью существующих моделей и ставит вопрос, действительно ли наблюдается единый джет с некоторым затухающим профилем скорости. В статье изучается возможность ситуации, что описанная структура радиоизображения отражает структуру «джет в джете».

ДЖЕТ В ДЖЕТЕ

Джет как целое описывается уравнениями Максвелла, условием бесконечной проводимости и законами сохранения вещества, энергии и импульса, записанными в релятивистской форме. При этом учитывается энергия и импульс как собственно вещества, так и содержащегося в нём электромагнитного поля. Также имеется некоторое уравнение состояния вещества джета, отражающее зависимость давления от плотности и внутренней энергии вещества.

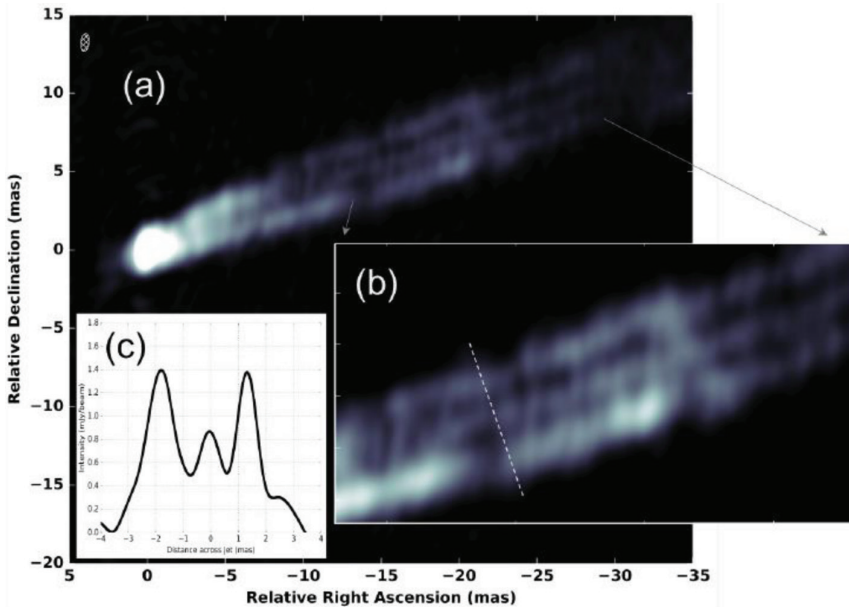


Рис. 1. Изображение джета в галактике M87 на частоте 15 ГГц и трёхгорбый поперечный профиль радиоинтенсивности (из статьи [Hada, 2017]).

Интенсивность радиоизлучения возрастает с числом излучающих частиц, поэтому радиоизлучающие области в изображении джета могут просто отражать области с активной плотной плазмой. В этом случае наблюдаемая трёхпиковая структура поперечного радиопрофиля (рис. 1) может непосредственно проявлять внутреннюю структуру джета и естественно интерпретироваться так: узкий внутренний джет помещён во внешний полый цилиндрический джет и оба джета соосны (рис. 2).

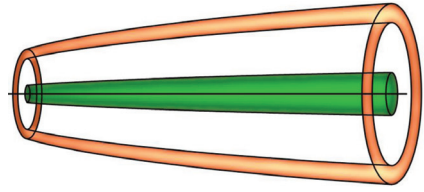


Рис. 2. Джет в джете

Отмеченные уравнения позволяют найти давление, электромагнитные поля, заряды и токи, плотность числа частиц, множественности, потоки масс во внутреннем и внешнем джетах и температуру. В частности, магнитное поле на основании джета приблизительно равно 80 Гс и оказывается достаточным для обеспечения наблюдаемой светимости джета, т.е. часто теоретически обсуждаемых больших величин магнитного поля порядка 10^3 – 10^4 Гс не требуется. При этом постоянное электрическое напряжение между внешним и внутренним джетами обеспечивает одинаковые наблюдаемые законы их расширения. Отсылая читателя, интересующегося деталями, к работе [Sob'yanin, 2017], здесь мы обсудим вопрос существования джета в джете.

ОБСУЖДЕНИЕ

Структура «джет в джете» может объясняться существованием подобного распределения начальной плотности истекающей плазмы около центральной машины активного галактического ядра, и это распределение играет роль граничных условий. В таком случае приведённые новые радионаблюдения самых внутренних областей галактики M87 могут являться доказательством одновременного действия двух различных механизмов запуска джета, один из которых даёт плазму для внутреннего джета и связан с центральной чёрной дырой, а другой даёт плазму для внешнего джета и связан с аккреционным диском. Иными словами, механизмы Блендфорда-Знайека и Блендфорда-Пейна могут действовать одновременно.

В общем случае основные уравнения, описывающие равновесие и динамику джетов, допускают бесконечное число возможных конфигураций газовых или плазменных потоков и соответствующих электромагнитных полей, и что джет в джете продолжает наблюдаться относительно далеко от активного галактического ядра свидетельствует о достаточной устойчивости всего джета: внутренний и внешний джеты прямые, постепенно расширяются с расстоянием от центральной машины и их соосность не нарушается. Как на качественном уровне понять возможность устойчивости? Электромагнитное поле является прослойкой, поддерживающей разделение джетов, а совокупное действие электромагнитного поля должно соответствовать отталкиванию, чтобы обеспечить взаимное выравнивание и соосность джетов. Тогда в джете должны протекать значительные продольные электрические токи, потому что электрическое поле само по себе приводит к неустойчивости относительно смещения

центрального джета от оси внешнего джета. Заметим, что если бы внутреннее магнитное поле отсутствовало, разделение зарядов между внешним и внутренним джетами исчезло бы из-за нейтрализации радиального электрического поля в результате перераспределения зарядов. Ненулевое магнитное поле играет значительную роль в предотвращении такого перераспределения. В первом приближении заряженная частица движется вдоль магнитного поля и одновременно дрейфует в поперечном направлении из-за скрещенных электрического и магнитного полей. Поскольку магнитные силовые линии являются спиралями, а электрическое поле радиально, полное движение заряженной частицы также происходит по спирали, хотя в общем случае не совпадающей с магнитной силовой линией. Мы видим, что электрический дрейф предотвращает движение заряженных частиц в радиальном направлении и тем самым поддерживает разделение зарядов.

Ток должен стабилизировать положение внутреннего джета, и внешний джет выступает не только как путь для обратного тока, но и как цилиндрическая проводящая стенка, содержащая внутреннее тороидальное магнитное поле и не позволяющая ему выходить наружу, тем самым обеспечивая возникновение возвращающих упругих сил благодаря возрастанию плотности магнитных силовых линий при смещении внутреннего джета от оси. Важно, что продольное магнитное поле тоже даёт вклад в стабилизацию внешнего джета. Джет не является твёрдым и если внутренний джет примет какую-либо искривлённую форму, стабилизирующий эффект внешнего джета исчезнет, если этот джет примет такую же форму, ведь при этом тороидальное магнитное поле не будет деформироваться. Продольное магнитное поле помогает поддерживать жёсткость внешнего джета, играя роль упругого стержня: изгибание внешнего джета приводит к появлению возвращающей силы благодаря струноподобному натяжению искривлённого магнитного поля.

В описанной выше стабилизации наряду с зарядовой нейтральностью важно полное замыкание тока, потому что тогда тороидальное магнитное поле во внешней среде отсутствует и сила снаружи определяется только внешним давлением. При неполном замыкании тока достаточно сильное изгибание джета как целого могло бы привести к возрастанию плотности силовых линий тороидального магнитного поля на вогнутой стороне изгиба и дать силу, которая потенциально могла бы преодолеть стабилизирующую силу внутреннего продольного поля и вызвать винтовую неустойчивость всего джета. Отсутствие внешнего тороидального поля и присутствие внутреннего продольного поля также является благоприятным фактором для стабилизации неустойчивости типа перетяжек, так как тогда отсутствует провоцирующее накопление силовых линий тороидального поля вокруг сужения, формирующегося при всестороннем сжатии джета, и в то же время имеется благоприятное повышение внутреннего магнитного давления, сопротивляющееся такому сжатию.

Данное обстоятельство могло бы объяснить, почему астрофизические джеты более устойчивы и протяжённы, чем лабораторные гидродинамические джеты. Даже если джет как целое не генерирует внешнее электромагнитное поле и при взгляде снаружи формально аналогичен гидродинамическому джету, существование внутренней электромагнитной структуры, характерной для джета в джете и отсутствующей в гидродинамическом джете, даёт дополнительный стабилизирующий эффект.

Что обеспечивает замыкание токов и сами токи? Джет как целое подключён к центральной машине активного галактического ядра, центральной сверхмассивной чёрной дыре с окружающим аккреционным диском. При условии бесконечной проводимости существование вертикального магнитного поля во вращающемся диске приводит к возникновению радиального электрического поля поперёк диска, поэтому индуцированная разность потенциалов между внешним и внутренним джетами может быть источником, поддерживающим циркуляцию электрического тока во всём джете. Этот эффект аналогичен хорошо известной генерации напряжения в униполярном индукторе (диске Фарадея).

ЛИТЕРАТУРА

- [Hada, 2017] *Hada K.* The Structure and Propagation of the Misaligned Jet M87 // *Galaxies*. 2017. V. 5(1). P. 2.
[Sob'yanin, 2017] *Sob'yanin D. N.* Jet in Jet in M87 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. V. 471. P. 4121–4127.

JET IN JET IN THE M87 GALAXY

D. N. Sob'yanin

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
I. E. Tamm Division of Theoretical Physics

New Very Long Baseline Interferometry observations of the prominent jet in the M87 radio galaxy at 15 GHz show a persistent triple-ridge structure of the transverse profile with a previously unobserved ultra-narrow central ridge. This radio structure can reflect the intrinsic structure of the jet, which in fact consists of two embedded coaxial jets. A relativistic magnetohydrodynamic model is developed in which an inner jet is placed inside a hollow outer jet and the corresponding electromagnetic fields, pressures and other physical quantities are calculated. The jet as a whole is connected to the central engine that generates voltage between the outer and inner jets responsible for the similar widening laws observed for the jets. The jet-in-jet structure can indicate simultaneous operation of two different jet-launching mechanisms, one relating to the central black hole and the other to the accretion disc. An inferred magnetic field of 80 G at the base is sufficient to provide the observed jet luminosity.

Keywords: jets, galaxies, M87

Sob'yanin Denis Nikolaevich — senior scientist, PhD, sobyanin@lpi.ru

ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ РАДИОИМПУЛЬС С ФРАКТАЛЬНОЙ ФАЗОЙ НА МЕЖПЛАНЕТНОЙ ТРАССЕ

Ю. С. Худышев, Г. М. Стрелков

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ФИРЭ РАН)

Выполнен анализ характера и особенностей дисперсионных искажений огибающей и корреляционных характеристик радиоимпульса с фрактальной фазой при распространении в бесстолкновительной холодной плазме, моделирующей межпланетную среду. Характерная ширина амплитудного спектра импульса на порядки величины превышает значения соответствующего параметра для импульса с аналогичными характеристиками и постоянной начальной фазой. Показано, что с увеличением интегральной электронной концентрации трассы огибающая импульса постепенно трансформируется к шумоподобному виду. При этом его авто- и частотная корреляционные функции становятся пикобразными с единственным максимумом. Максимумы обеих функций при прочих равных условиях сужаются с увеличением как интегральной электронной концентрации, так и «девиации» фрактальной фазы. Приведены примеры возможного влияния вариаций несущей частоты и длительности импульса на характеристики деформированного импульса.

Ключевые слова: фрактальный радиоимпульс, дисперсионные искажения, межпланетная плазма

ВВЕДЕНИЕ

Задачи повышения помехоустойчивости, устранения посторонних абонентов и противодействия обнаружению работы систем связи самого различного назначения в настоящее время решаются, в том числе, через применение хаотических (шумоподобных) радиосигналов (см., например, [Гуляев и др., 2003; Калинин, Чапурский, 2015; Кальянов, 2009; Кушнир и др., 2014]). Параметры таких сигналов (амплитуда, фаза, частота) изменяются в процессе излучения совместно или по отдельности в соответствии с конкретными математическими алгоритмами (примеры см., например, в статьях [Васюта и др., 2012; Seventline et al., 2010]), а их спектры также шумоподобны и имеют характерные значения ширины, многократно превышающие соответствующие величины для детерминированных сигналов равной длительности.

Обратим внимание на два обстоятельства. Во-первых, анализ литературных источников показывает, что при получении и сопоставлении оценок эффективности применения того или иного алгоритма формирования хаотического сигнала до настоящего времени не находят отражения вопросы возможного влияния на их характеристики среды распространения, в частности, плазменной среды. Между тем следует полагать, что на достаточно протяжённых трассах частотная дисперсия заведомо будет приводить к изменению дифференциальных и корреляционных характеристик распространяющихся сигналов, что обусловит и последующие вариации соответствующих оценок. Во-вторых, возможным способом расширения спектров импульсных сигналов может стать введение фрактальных временных зависимостей их модулирую-

мых характеристик (см., например, [Малышев, Раевский, 2013; Болотов, Ткач, 2006; Захаров, Мейланов, 2001]).

В статье [Худышев, Стрелков, 2017] приведён анализ дисперсионных искажений импульса, представляющего собой смесь сильного хаотического и слабого детерминированного подымпурсов равной длительности в холодной плазменной среде при интегральной электронной концентрации трассы, характерной для межпланетных расстояний. Поле первого из них (и, фактически, способ расширения спектра хаотического подымпурса) задаётся как решение модифицированного уравнения Ван дер Поля [Вадивасова и др., 2006]. Из полученных результатов следует, что в зависимости от конкретных значений параметров импульса и протяжённости трассы его последующее распространение в межпланетной среде может сопровождаться принципиальными деформациями исходной формы. Цель настоящей работы — на основе теоретических соотношений, принятых в работе [Худышев, Стрелков, 2017], рассмотреть возможные характер и особенности дисперсионных искажений радиоимпульса с начальной прямоугольной формой и постоянной несущей, начальная фаза которого в процессе излучения описывается фрактальной зависимостью.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАЕМОГО ИМПУЛЬСА

Начальную комплексную огибающую излучаемого прямоугольного радиоимпульса примем в виде:

$$\tilde{A}(0; t) = A_0 \exp(i\Phi_x(0; t)), \quad 0 \leq t \leq t_{\text{и}}. \quad (1)$$

Здесь A_0 — «высота» импульса;

$$\Phi_x(0; t) = \Phi_0 + \frac{\Delta\Phi}{2} \cdot \frac{2}{\pi^b} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2b} \sin\left[2\pi n^2 N \frac{t}{t_{\text{и}}}\right], \quad 0 \leq t \leq t_{\text{и}} \quad (2)$$

— его мгновенная фрактальная фаза; Φ_0 и $\Delta\Phi$ — постоянная составляющая и «девиация» мгновенной фрактальной фазы; b — параметр, $b \geq 0,5$; N — число полных периодов колебаний фрактальной фазы в течение длительности излучаемого импульса $t_{\text{и}}$; t — время. Соотношение (2) — один из вариантов описания фрактальных сигналов, предложенных в работе [Лазоренко, Черногор, 2005].

На рис. 1а и б даны примеры временного хода функции $\Phi_x(0, t)$ для двух значений девиации $\Delta\Phi = 2$ и 20 рад и прочих равных условиях. Для удобства величины фазы даны в градусах. Приведённые кривые $\Phi_x(0, t)$ различаются только соответствующими им масштабами по оси ординат. Амплитудные спектры начальной огибающей импульса (1) микросекундной длительности с несущей частотой $f' = 2$ ГГц, соответствующие приведённым кривым $\Phi_x(0, t)$ и вычисленные в частотном интервале от 1,9 до 2,1 ГГц, изображены на рис. 1в и г. Энергии спектров составляют $\sim 0,999$ (см. рис. 1в) и $\sim 0,997$ (см. рис. 1г) от энергии излучаемого импульса, а их среднеквадратические ширины равны $\sim 4,8$ и $\sim 16,8$ МГц соответственно. Таким образом, при принятых значениях параметров введение хаотической фазы приводит к расширению его спектра а увеличение $\Delta\Phi$ при сохранении энергии спектра сопровождается заметным усложнением его структуры (хаотизацией).

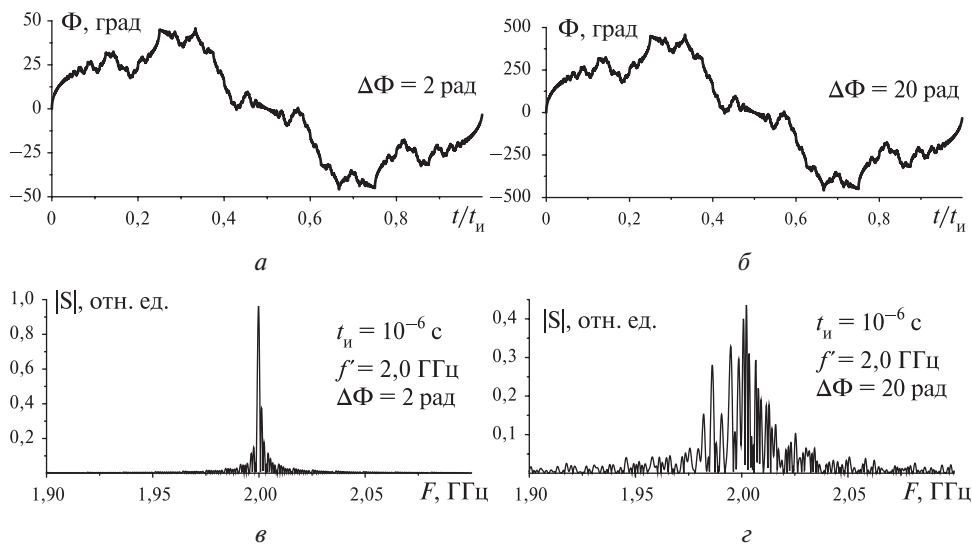


Рис. 1. Фрактальная фаза (а, б) и амплитудный спектр (в, г) прямоугольного импульса (1) при $\Delta\Phi = 2$ рад (а, в) и 20 рад (б, г); $N = 1$; $f' = 2$ ГГц и $t_{и} = 1$ мкс

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Последующая эволюция комплексной огибающей импульса (1) в плазменной среде описывается выражениями [Стрелков, 2008]:

при $0 \leq t' \leq t_{и}$ —

$$\tilde{A}(\text{ТЕС}; t') = \tilde{A}(0; t') - \int_0^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-(v_3 + i\omega')\theta) \tilde{A}(0; t' - \theta) d\theta \quad (3)$$

и при $t' > t_{и}$ —

$$\tilde{A}(\text{ТЕС}; t') = - \int_{t'-t_{и}}^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-(v_3 + i\omega')\theta) \tilde{A}(0; t' - \theta) d\theta. \quad (4)$$

В равенствах (3) и (4) введены обозначения: $\omega' = 2\pi f'$; f' — несущая; $t' = t - z/c$; z — длина трассы; c — скорость света; $\delta = \delta(z) = \int_z^z \omega_0^2(z) dz / 2c$;

ω_0 — плазменная частота, $\omega_0^2 = 31,81 \cdot 10^8 N_e$; N_e — электронная концентрация (см^{-3}); v_3 — эффективная частота соударений. Нетрудно видеть, что параметр δ прямо пропорционален величине интегрального электронного содержания трассы $\text{ТЕС} = \int_z N_e(z) dz$ (м^{-2}).

Все приводимые ниже результаты по деформации радиоимпульсов получены с применением формул (3) и (4) в предположении бесстолкновительной

плазмы ($v_g = 0$). Последнее равносильно, в частности, отсутствию поглощения в среде, так что энергия распространяющегося импульса

$$E_{\text{и}}(\text{ТЕС}) = \int_0^{\infty} |\tilde{A}(\text{ТЕС}; t')|^2 dt' = E_{\text{и}}(0)$$

остаётся неизменной. Это обеспечивает возможность дополнительного контроля результатов.

ОГИБАЮЩАЯ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ИМПУЛЬСА С ФРАКТАЛЬНОЙ ФАЗОЙ

На рис. 2 и 3 представлены две совокупности кривых в пределах текущей длительности импульса изображающих временной ход величины $|\tilde{A}(\text{ТЕС}; t')|$ при изменении девиации мгновенной фазы $\Delta\Phi$ (рис. 2) или интегрального электронного содержания ТЕС (рис. 3) и неизменных значениях других параметров задачи (указаны в подписях). По аналогии величину $|\tilde{A}|$ далее будем называть текущей огибающей распространяющегося импульса. Энергия импульсов с текущими огибающими на рис. 2 и 3 (см. с. 137) во всех случаях отличается от своего начального значения $E_{\text{и}}(0)$ менее чем на 0,1 %.

Если девиация фазы относительно мала ($\Delta\Phi = 2$ рад), импульс может сохранять близкую к первоначальной форму вплоть до характерной для межпланетных трасс величине ТЕС (см. рис. 2а), дополнительно приобретая лишь слабо выраженные переднее и заднее крылья и смещаясь вправо по временной оси. Последующее возрастание девиации приводит к постепенно и заметно увеличивающейся хаотизации огибающей (см. рис. 2б–д), так что при начальной единичной высоте импульса величины $|\tilde{A}|$ могут варьировать в пределах от почти нулевых значений до ~ 2 (см. рис. 2е). Положение центра тяжести $t_{\text{цт}}$ кривых на рис. 2 остаётся практически неизменным, во всех случаях отклоняясь от значения $3,85t_{\text{и}}$ менее чем на 0,1 %. Изменения среднеквадратической ширины $\Delta t_{\text{и}}$ кривых на рис. 2 также малы. На рис. 2а она равна $0,292t_{\text{и}}$; на рис. 2б – $0,295t_{\text{и}}$ и на рис. 2е – $0,305t_{\text{и}}$. Возрастание $\Delta t_{\text{и}}$ непосредственно обусловлено некоторым увеличением высоты и протяжённости обеих крыльев деформирующейся огибающей. Таким образом, одним из возможных сценариев процесса распространения импульса (1) на межпланетной трассе является его постепенная трансформация к виду хаотического (шумоподобного) сигнала или, иначе, случайного процесса, практически без изменения характерной длительности и/или времени запаздывания.

Кривым на рис. 3 соответствуют различающиеся значения ТЕС и постоянное значение девиации фазы $\Delta\Phi = 10$ рад. При этом рис. 3г построен при тех же параметрах задачи, что и рис. 2д. Увеличение ТЕС трассы также сопровождается нарастанием хаотизации текущей огибающей и запаздывания импульса. Однако вариации его характеристик оказываются теперь значительно более выраженными. Так, временная координата центра тяжести $t_{\text{цт}}$ огибающей увеличивается с $0,503t_{\text{и}}$ на рис. 3а до $34,07t_{\text{и}}$ на рис. 3е, а их среднеквадратическая ширина $\Delta t_{\text{и}}$ — с $0,229t_{\text{и}}$ на рис. 3а до $0,591t_{\text{и}}$ на рис. 3е.

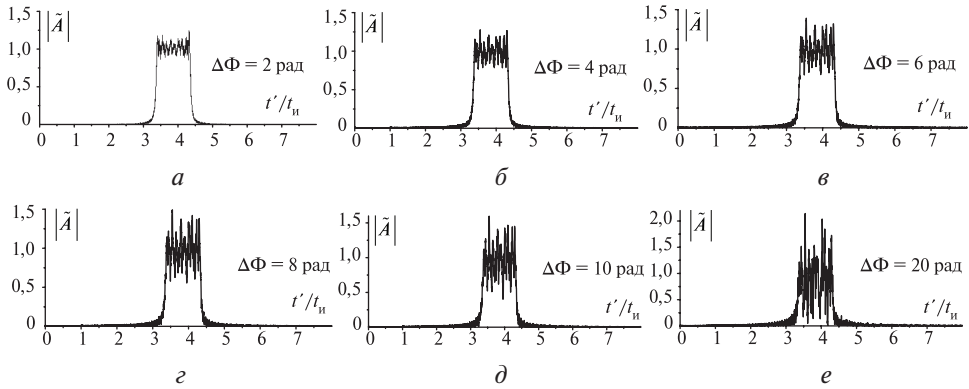


Рис. 2. Текущая огибающая импульса (1) в межпланетной плазме при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_n = 1$ мкс; $f' = 2$ ГГц; $TEC = 10^{20} \text{ м}^{-2}$; $\Phi_0 = 0$ и $\Delta\Phi = 2$ рад (а); 4 (б); 8 (в); 10 (д); 20 рад (е)

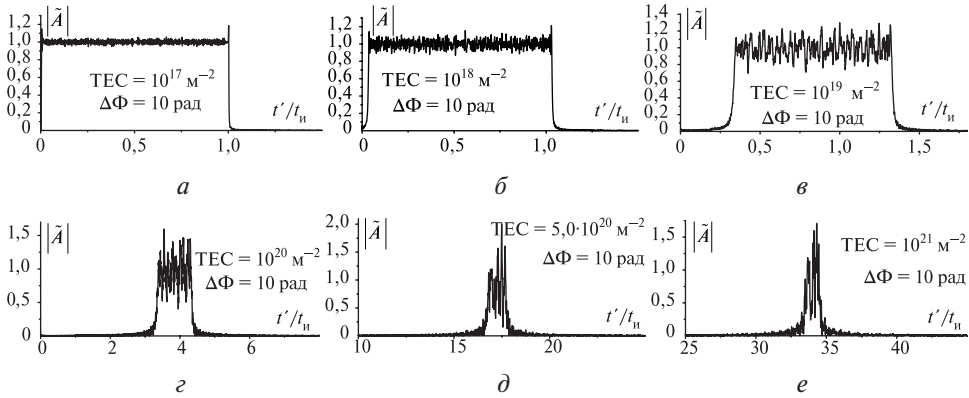


Рис. 3. Текущая огибающая импульса (1) в межпланетной плазме при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_n = 1$ мкс; $f' = 2$ ГГц; $\Phi_0 = 0$ и $\Delta\Phi = 10$ рад и $TEC = 10^{17} \text{ м}^{-2}$ (а); 10^{18} (б); 10^{19} (в); 10^{20} (г); $5,0 \cdot 10^{20}$ (д), 10^{21} м^{-2} (е)

Результаты вычисления поля по формулам (3) и (4) позволяют далее находить любые дифференциальные и интегральные характеристики распространяющегося импульса. К последним относятся и его корреляционные функции (далее — КФ), из которых для практических приложений наиболее употребительной является, по-видимому, автокорреляционная функция (далее — АКФ)

$$\Psi_A(TEC; \mu) = \left| \frac{1}{E_n(TEC)} \int_{\mu}^{\infty} \tilde{A}^*(TEC; t' - \mu) \tilde{A}(TEC; t') dt' \right| \quad (5)$$

и частотная корреляционная функция (далее — ЧКФ)

$$\Psi_F(TEC; F) = \left| \frac{1}{E_n(TEC)} \int_0^{\infty} \tilde{A}^*(TEC; t') \tilde{A}(TEC; t') \exp(2\pi i F t') dt' \right| \quad (6)$$

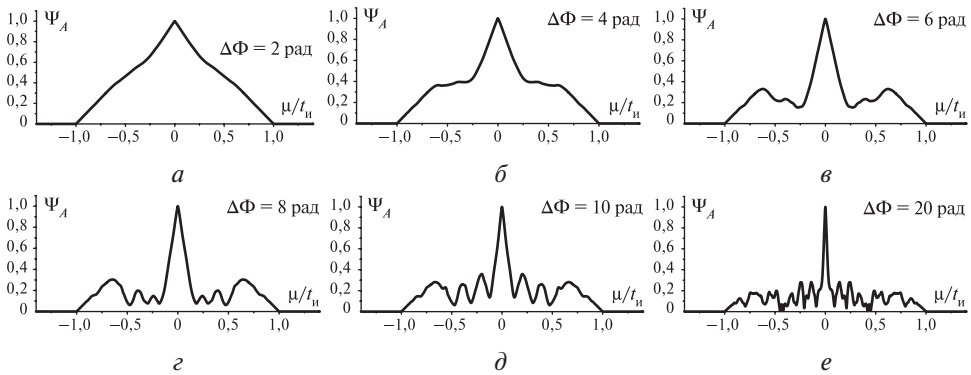


Рис. 4. Автокорреляционная функция импульса (1) в межпланетной плазме при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_n = 1$ мкс; $f' = 2$ ГГц; $TEC = 10^{20}$ м⁻²; $\Phi_0 = 0$ и $\Delta\Phi = 2$ рад (а); 4 (б); 6 (в); 8 (г); 10 (д) и 20 (е) рад

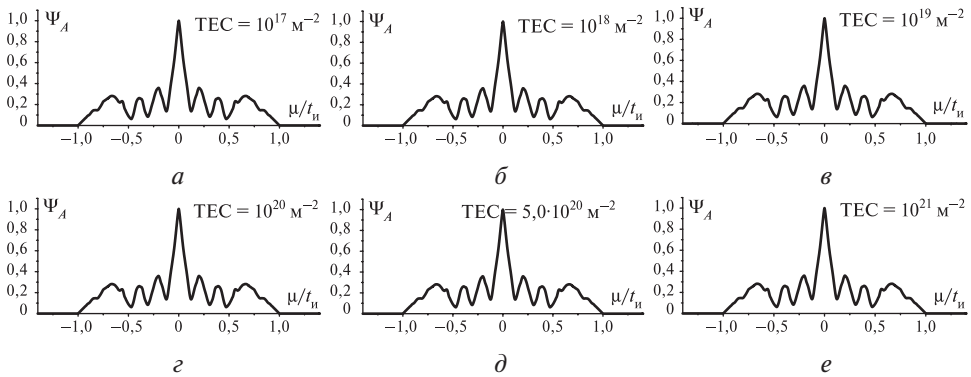


Рис. 5. Автокорреляционная функция импульса (1) в межпланетной плазме при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_n = 1$ мкс; $f' = 2$ ГГц; $\Phi_0 = 0$ и $\Delta\Phi = 10$ рад и $TEC = 10^{17}$ м⁻²(а); 10^{18} (б); 10^{19} (в); 10^{20} (г); $5,0 \cdot 10^{20}$ (д) и 10^{21} (е) м⁻²

Обозначения в формулах (5) и (6): μ — временной сдвиг; $F = f - f'$ — разностная частота; $*$ — знак комплексного сопряжения. Вид КФ определяет возможности радиосистем по точности измерений дальности и скорости целей. В прямоугольной системе координат $(\mu; F; \Psi)$ кривые $\Psi_A(TEC; \mu)$ и $\Psi_F(TEC; F)$ представляют собой сечения поверхности неопределённости импульса $\Psi(TEC; \mu; F)$ плоскостями $F = 0$ и $\mu = 0$ соответственно. На начальном этапе их изучения представляет интерес, по-видимому, установить возможный характер деформации КФ, обусловливаемый изменениями TEC.

На рис. 4 и 5 приведены АКФ импульса с фрактальной фазой, отвечающие огибающим на рис. 2 и 3 соответственно. Заметим, что у совпадающих огибающих на рис. 2д и 3г совпадают и их АКФ (см. рис. 4д и 5д). Представленные совокупности АКФ демонстрируют заметно различающийся характер поведения АКФ при возрастании только $\Delta\Phi$ (см. рис. 4) или только TEC (см. рис. 5) и прочих равных условиях. Увеличение девиации фазы приводит к формированию всё более узкого центрального максимума АКФ на фоне

снижающихся по высоте боковых максимумов. С увеличением же интегральной электронной концентрации при заметных вариациях вида текущих огибающих (см. рис. 3) вид АКФ по достижении некоторого значения ТЕС стабилизируется вместе с уровнем боковых максимумов. Все кривые на рис. 5 также имеют узкий и высокий по сравнению с пьедесталом максимум и могут рассматриваться как достаточно близкие к идеальным АКФ. В отсутствии выраженных боковых максимумов основной характеристикой АКФ является величина $\Delta\mu_{0,5}(\text{ТЕС})$, равная ширине её центрального пика по уровню 0,5. В частности, на рис. 4д и 5д ширина АКФ равна $\sim 0,125t_{и}$.

Совокупность ЧКФ импульса с хаотической фазой, соответствующих кривым $|\tilde{A}|$ на рис. 2 и кривым АКФ на рис. 4, представлена на рис. 6. Кривые ЧКФ также имеют единственный максимум, пьедестал которого по сравнению с пьедесталом кривых на рис. 4 ещё менее выражен. Аналогично, ЧКФ, соответствующие кривым $|\tilde{A}|$ на рис. 3 и кривым АКФ на рис. 5, приведены на рис. 7 (см. с. 140). Влияние величины ТЕС проявляется здесь лишь через вариации формы пьедестала. Таким образом, в рассмотренных случаях кривые ЧКФ имеют единственный центральный максимум, высота которого многократно превышает высоту боковых максимумов. Поэтому их единственной характеристикой является теперь величина $\Delta F_{0,5}(\text{ТЕС})$, определяемая по аналогии с величиной $\Delta\mu_{0,5}(\text{ТЕС})$. В частности, на рис. 6д и 7д ширина ЧКФ равна $\sim 1,2 \text{ МГц}$.

В целом совокупность КФ, изображённых на рис. 4–7, позволяет допустить, что влияние среды распространения не будет приводить к разрушению изначально «игольчатой» структуры тела неопределённости импульса (1).

Поскольку энергия импульса (1) в процессе распространения не изменяется (см. выше), в приложениях может представлять интерес взаимная корреляционная функция излучённого и распространяющегося импульсов (далее — ВКФ)

$$\Psi_M(\text{ТЕС}; \mu) = \left| \frac{1}{E_{и}(\text{ТЕС})} \int_{\mu}^{\infty} \tilde{A}^*(0; t' - \mu) \tilde{A}(\text{ТЕС}; t') dt' \right|. \quad (7)$$

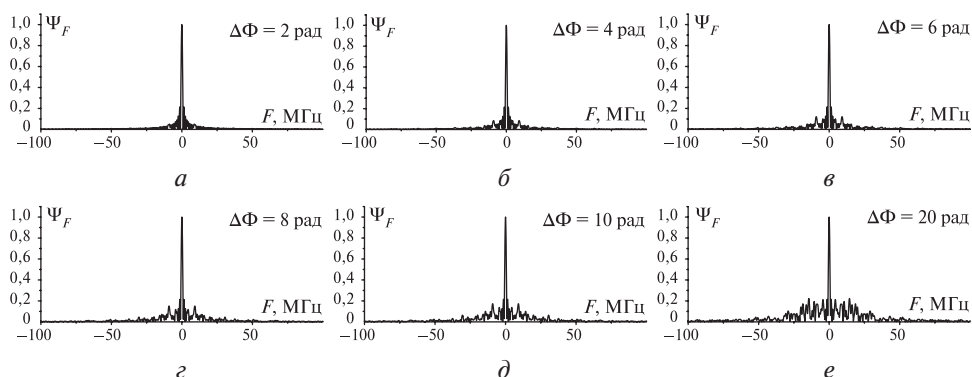


Рис. 6. Частотная корреляционная функция импульса (1) в межпланетной плазме при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_{и} = 1 \text{ мкс}$; $f' = 2 \text{ ГГц}$; $\text{ТЕС} = 10^{20} \text{ м}^{-2}$; $\Phi_0 = 0$ и $\Delta\Phi = 2 \text{ рад}$ (а); 4 (б); 6 (в); 8 (г); 10 (д) и 20 рад (е)

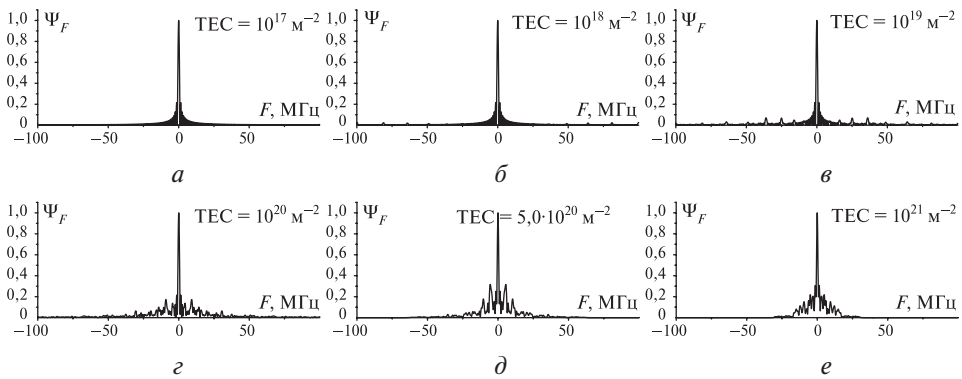


Рис. 7. Частотная корреляционная функция импульса (1) в межпланетной плазме при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_{и} = 1$ мкс; $f' = 2$ ГГц; $\Phi_0 = 0$ и $\Delta\Phi = 10$ рад (а) и $TEC = 10^{17} \text{ м}^{-2}$ (а); 10^{18} (б); 10^{19} (в); 10^{20} (г); $5,0 \cdot 10^{20}$ (д) и 10^{21} (е) м^{-2}

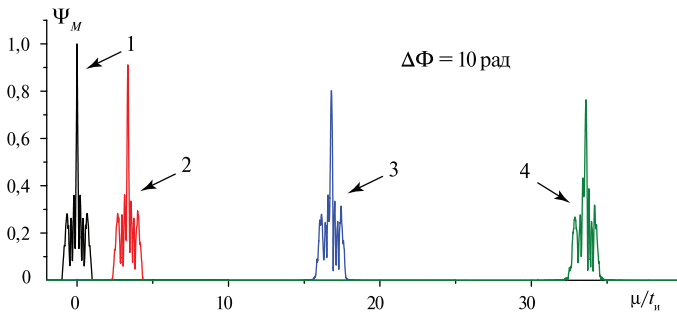


Рис. 8. Взаимокорреляционные функции излучённого и деформированного на межпланетной трассе импульса при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_{и} = 1$ мкс; $f' = 2$ ГГц; $\Phi_0 = 0$ и $\Delta\Phi = 10$ рад и $TEC = 10^{17} \text{ м}^{-2}$ (1); 10^{20} (2); $5,0 \cdot 10^{20}$ (3) и 10^{21} м^{-2} (4)

На рис. 8 приведены примеры деформации ВКФ, обуславливаемые возрастанием TEC. Принятые здесь для кривых 1–4 значения $\Delta\Phi$ и TEC те же, что и у текущих огибающих на рис. 3а и 3г–е соответственно. Наиболее выраженной особенностью представленных кривых является, по-видимому, сохранение у них выраженного основного максимума и отсутствие выраженных боковых максимумов даже при значительной деформации текущей огибающей. Эта особенность ВКФ полностью обусловлена фрактальной структурой фазы излучаемого импульса.

О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА С ХАОТИЧЕСКОЙ ФАЗОЙ НА ИСКАЖЕНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

Результаты, приведённые на рис. 2–8, и основанные на них выводы получены при неизменных значениях несущей частоты и длительности импульса. Вместе с тем величины указанных параметров задачи, в принципе, могут значительно отличаться от значений, принятых для них выше.

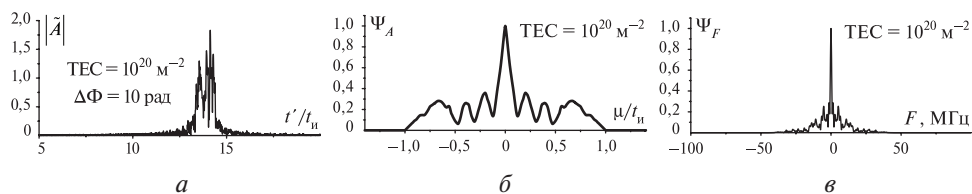


Рис. 9. Огибающая (*a*) и авто- (*б*) и частотная (*в*) корреляционные функции импульса (1) на межпланетной трассе при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_{и} = 1$ мкс; $f' = 1$ ГГц; $\Phi_0 = 0$; $\Delta\Phi = 10$ рад и $TEC = 10^{20} \text{ M}^{-2}$

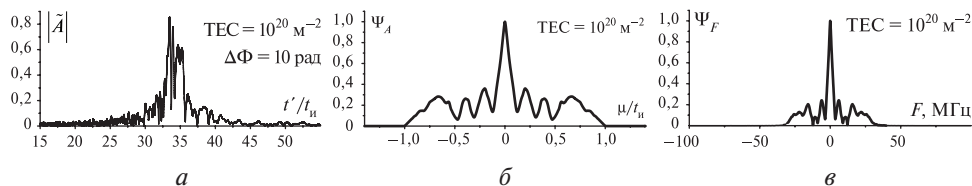


Рис. 10. Огибающая (*a*) и авто- (*б*) и частотная (*в*) корреляционные функции импульса (1) на межпланетной трассе при $A_0 = 1$; $N = 1$; $t_{и} = 0,1$ мкс; $f' = 2$ ГГц; $\Phi_0 = 0$; $\Delta\Phi = 10$ рад и $TEC = 10^{20} \text{ M}^{-2}$

Получение оценок их влияния на характеристики деформированного импульса должно явиться предметом дополнительного анализа. Здесь коснёмся указанного вопроса кратко. На рис. 9 и 10 приведены примеры характеристик радиоимпульса с фрактальной фазой, полученные при альтернативных значениях f' и $t_{и}$. Текущая огибающая, АКФ и ЧКФ на рис. 9 отвечают указанным характеристикам на рис. 2д, 4д и 6д соответственно, но получены для вдвое меньшей несущей частоты $f' = 1$ ГГц. Временное запаздывание импульса и вид его текущей огибающей заметно изменились (например, $\Delta t_{и} = 0,498 t_{и}$ для рис. 9а), что, однако, практически не оказало влияния на вид КФ (см. рис. 9б и в). Аналогично, текущая огибающая, АКФ и ЧКФ на рис. 10 также отвечают указанным характеристикам на рис. 2д, 4д и 6д соответственно, но получены теперь для импульса меньшей длительности $\Delta t_{и} = 0,1$ мкс. С укорочением импульса можно констатировать сохранение вида и особенностей КФ (рис. 10б и в) при ещё более выраженной деформации текущей огибающей ($\Delta t_{и} = 2,39 t_{и}$ для рис. 10а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложены предварительные результаты теоретического анализа процесса распространения по межпланетной трассе радиоимпульса с начальными прямоугольной формой и фрактальной фазой. Межпланетная среда моделируется как бесстолкновительная плазма. Переход к фрактальной структуре фазы является возможным способом обеспечить одновременно расширение и шумоподобный вид спектра излучаемого импульса.

При рассмотренных характеристиках излучаемого импульса с увеличением девиации фрактальной фазы и/или интегрального электронного содержания

трассы в процессе распространения происходит постепенная хаотизация его текущей огибающей, иначе, трансформация первоначально прямоугольного импульса к шумоподобному виду. При рассмотренных значениях параметров излучаемого импульса вплоть до величин $TEC \sim 10^{21} \text{ м}^{-2}$ пиковые значения поля в хаотизированном импульсе остаются сопоставимыми с их значениями в излучаемом импульсе. Вследствие влияния среды у авто- и частотной корреляционных функций деформированного импульса всегда формируются и сохраняются при возрастании TEC узкие центральные пики, высоты которых многократно превышают высоты вторичных пиков пьедестала и характерные ширины определяются конкретными значениями TEC и $\Delta\Phi$, уменьшаясь при их возрастании.

ЛИТЕРАТУРА

- [Болотов, Ткач, 2006] *Болотов В. Н., Ткач Ю. В.* Генерирование сигналов с фрактальными спектрами // *ЖТФ*. 2006. Т. 76. Вып. 4. С. 91–99.
- [Вадивасова и др., 2006] *Вадивасова Т. Е., Анищенко В. С., Окрокверцхов Г. А., Захарова А. С.* Статистические свойства мгновенной фазы зашумленных периодических и хаотических автоколебаний // *Радиотехника и электроника*. 2006. Т. 51. № 5. С. 580–592.
- [Васюта и др., 2012] *Васюта К. С., Малышев А. А., Зоц Ф. Ф.* Анализ корреляционных свойств хаотических радиоимпульсов // *Системи обробки інформації*. 2012. Т. 2. Вып. 3(101). С. 22–25.
- [Гуляев и др., 2003] *Гуляев Ю. В., Беляев Р. В., Воронцов Г. М.* и др. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации. // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 10. С. 1157–1185.
- [Захаров, Мейланов, 2001] *Захаров В. А., Мейланов Р. П.* О дискретизации сигнала с фрактальной структурой // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2001. Т. 44. № 8. С. 709–711.
- [Калинин, Чапурский, 2015] *Калинин В. И., Чапурский В.* Передача информации на основе шумовых сигналов со спектральной модуляцией. // *Радиотехника и электроника*. 2015. Т. 60. № 10. С. 1025–1035.
- [Кальянов, 2009] *Кальянов Э. В.* Скрытая передача информации при использовании запаздывания для выделения полезного сигнала из маскирующих колебаний. // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35. № 6. С. 56–62.
- [Кушнир и др., 2014] *Кушнир А. И., Васюта К. С., Крыжский Ф. В., Зоц Ф. Ф.* Корреляционные свойства радиоимпульса, сформированного с применением псевдослучайной последовательности Лемера // *Сбірник наукових праць ХУПС*. 2014. Вып. 3. С. 69–72.
- [Лазоренко, Черногор, 2005] *Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф.* Фрактальные сверхширокополосные сигналы // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2005. Т. 10. № 1. С. 62–84.
- [Малышев, Раевский, 2013] *Малышев Г. С., Раевский А. С.* О прохождении фрактального импульса в зашумленном волоконно-оптическом канале // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. Вып. 17. С. 71–79.
- [Стрелков, 2008] *Стрелков Г. М.* Сложный радиосигнал в ионосферной плазме. // *Радиотехника и электроника*. 2008. Т. 53. № 9. С. 1094–1103.
- [Худышев, Стрелков, 2017] *Худышев Ю. С., Стрелков Г. М.* О возможной особенности искажений сверхкороткого радиоимпульса на межпланетной трассе // 14-я Конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 130–142.
- [Seventline et al., 2010] *Seventline J. B., Rani D. E., Rajeswari K. R.* Ternary Chaotic Pulse Compression Sequences // *Radioengineering*. 2010. V. 19. No. 3. P. 415–419.

A RECTANGULAR RADIO WAVE PULSE WITH A FRACTAL PHASE ON THE INTERPLANETARY PATH

Y. S. Khudyshev, G. M. Strelkov

Fryazino branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics Russian Academy of Sciences (IRE RAS)

The analysis of the character and features of dispersion distortions of the envelope and correlation characteristics of the radio wave pulse with the fractal phase during propagation in a collision-less cold plasma modeling interplanetary medium is performed. The characteristic widths of the amplitude spectrum of the pulse orders of magnitude higher than the corresponding parameter for a pulse with similar characteristics and a constant initial phase. It is shown that with an increase in the integrated electron concentration of the path, the envelope of the pulse gradually transforms to a noise-like appearance. At the same time, its auto- and frequency correlation functions become peak-like with a single maximum. The maximums of both functions, all other things being equal, narrow with increasing both the integrated electron concentration and the "deviation" of the fractal phase. Examples of possible influence of variations in the carrier frequency and pulse duration on the characteristics of the deformed pulse are given.

Keywords: fractal radio wave pulse, dispersion distortions, interplanetary plasma

Khudyshev Yuriy Sergeevich — junior researcher, XAntaresX@yandex.ru

Strelkov German Mikhaylovich — doctor of physical and mathematical sciences, professor

СИСТЕМА ПРОГРАММ OPTIMSPECTROMETER ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СПЕКТРОМЕТРОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Н. П. Чирская, И. А. Золотарев, В. И. Тулунов, Л. С. Новиков, В. И. Оседло

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

Радиационный мониторинг околоземного космического пространства осуществляется с помощью спектрометров заряженных частиц. Сложность создания универсального устройства для радиационного мониторинга обусловлена многокомпонентностью потоков ионизирующего излучения и неоднородностью радиационных условий в околоземном пространстве. Для проектирования спектрометров требуется оптимизировать параметры, влияющие на их характеристики, для каждой целевой орбиты спутников.

Статистические методы обработки полученных в результате численного моделирования данных позволяют уточнить величины порогов приборов и определить эффективность регистрации в отдельных энергетических каналах. Данный подход требует большого объёма расчётов из-за варьирования параметров конструкции спектрометра. Для упрощения таких процедур разработана методика расчёта и комплекс программ OptimSpectrometer для подбора параметров геометрии спектрометров и их энергетических порогов.

Ключевые слова: спектрометр заряженных частиц, калибровка, космическое излучение, отбор событий, математическое моделирование

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наиболее известными моделями, используемыми для оценки радиационных условий на различных орбитах, являются международные справочные модели *AE8/AP8* [Sawyer, Vette, 1976; Vette, 1991] и *AE9/AP9* [Whelan, 2014], предназначенные для описания потоков электронов и протонов. Первая из этих моделей построена на основании массивов экспериментальных данных 1960–1970-х гг., а вторая в настоящее время тестируется и уточняется.

Наиболее надёжным способом определения реальных радиационных условий эксплуатации космических аппаратов (КА) является проведение измерений потоков частиц, воздействующих на аппарат, с помощью приборов, установленных на рассматриваемом КА, либо на аппаратах, функционирующих на близких орбитах. Для проведения подобных измерений часто используются приборы, в которых регистрация электронов и протонов осуществляется с помощью детекторов, объединяемых в телескопические системы [Гальперин и др., 1972].

Чирская Наталья Павловна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, chirskaya.sinp@yandex.ru

Золотарев Иван Анатольевич — младший научный сотрудник

Новиков Лев Симонович — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор

Тулунов Владимир Иванович — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Оседло Владислав Ильич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук

Интерпретация показаний приборов проводится на основании лабораторных градуировок. Однако получаемая при градуировках информация недостаточно полна, поскольку в лабораторных экспериментах практически невозможно корректно воспроизвести энергетические и угловые распределения, характерные для потоков заряженных частиц в космическом пространстве.

При прохождении потока заряженных частиц через детекторы потери энергии отдельных частиц испытывают флуктуации, обусловленные статистической природой процесса ионизации, причём особенно велик разброс потерь энергии при регистрации электронов. Поэтому для достижения необходимой точности измерений необходимы численные методы расчётов энерговыделения в детекторах.

В настоящей работе изложены результаты численного моделирования взаимодействия потоков электронов и протонов с детекторами и результаты статистического анализа полученных данных, позволяющие повысить точность определения метрологических характеристик исследуемых телескопических детекторов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЁТОВ

Для проведения моделирования коллективом авторов создана система программ OptimSpectrometer, в которой в настоящее время реализованы:

- расчёт величин потерь энергии электронов и протонов в элементах спектрометра с помощью GEANT4 [Agostinelli et al., 2003];
- использование описания геометрии в формате gdmf для быстрого изменения параметров геометрии прибора при расчётах в GEANT4;
- статистический анализ данных в среде R-studio (URL: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/>) методом перцентилей;
- выбор параметров отбора методом перцентилей на основе селективности и чувствительности критерия отбора.

Расчёты проводились на примере реального телескопического спектрометра протонов и электронов (СПЭ), характеристики которого рассмотрены в работе [Гецелев и др., 2006]. Основным элементом СПЭ является детекторный блок (ДБ), состоящий из нескольких полупроводниковых детекторов (ППД)

различной толщины и сцинтиляционного детектора, расположенных один под другим на единой оси. Данный спектрометр позволяет отдельно регистрировать потоки протонов и электронов в достаточно узких интервалах энерговыделения падающих частиц. Схема исследуемой телескопической системы показана на рис. 1.

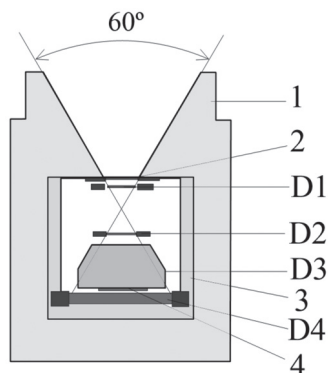


Рис. 1. Схема исследуемого детекторного блока: 1 — корпус; 2 — фольга; 3 — оргстекло; 4 — фотодиод; D1–D4 — детекторы

Перед детекторами располагается коллиматор с углом раствора 60° . Первый ППД (D1) толщиной 0,04 мм защищён фольгой, которая имеет толщину, эквивалентную 10 мкм кремния. Вторым ППД (D2) имеет толщину 0,5 мм, третьим детектором (D3) является сцинтиллятор CsI толщиной 10 мм, а четвёртым детектором (D4) — вновь ППД толщиной 1 мм. Между D3 и D4 расположен фотодиод с эквивалентной толщиной 300 мкм Si, который преобразует световые вспышки в сцинтилляторе от проходящих частиц в электрические импульсы. Боковые стенки корпуса детекторного блока состоят из слоя латуни толщиной 10 мм и слоя оргстекла толщиной 5 мм.

Расчёты величин потерь энергии электронов и протонов в элементах ДБ проводились для трёхмерной модели при изотропном падении электронов и протонов с помощью программного комплекса GEANT4. Для описания геометрии системы использован формат gdm1-файлов [Chytracsek et al., 2006], что позволяет изменять параметры геометрии без перекомпиляции программы. Последующая статистическая обработка полученных данных проводилась в среде R-studio.

При моделировании с помощью комплекса GEANT4 использовались библиотека электромагнитных процессов Livermore [Ivanchenko et al., 2011] и библиотека QGSP_BIC_HP (URL: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>) для учёта процессов ядерных взаимодействий при прохождении протонов через телескопическую систему.

Для проведения анализа работы прибора были использованы энергетические спектры электронов и протонов, полученные из моделей *AE8* и *AP8* для нескольких специально подобранных орбит, данные радиационного мониторинга на которых дают возможность предсказания радиационных условий для большого числа орбит КА [Панасюк и др., 2015]. На рис. 2 показаны дифференциальные спектры частиц для круговой орбиты с высотой 1700 км с наклоном 77° , имеющей значение параметра геомагнитного поля $L \sim 1,4$. Для каждого спектра расчёт проводился с использованием 10^8 событий (падающих частиц), что позволило набрать достаточную статистику сигналов для верхних энергетических каналов (выше 4 МэВ для электронов и выше 100 МэВ для протонов).

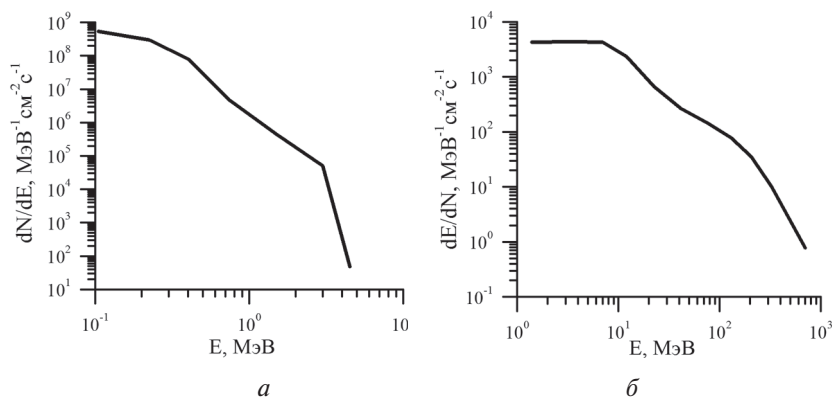


Рис. 2. Исходные дифференциальные спектры электронов (а) и протонов (б) на круговой орбите 1700 км с $L \sim 1,4$, использованные при расчёте в программе GEANT4

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В СПЭ находятся электронные логические устройства отбора, работающие на принципе совпадений и антисовпадений импульсов, которые позволяют получать энергетическое распределение (зависимость потоков частиц от энергии) электронов и протонов в пространстве и во времени в нескольких энергетических интервалах. Границы энергетических интервалов были выбраны следующим образом: для электронов с энергиями 0,15–10,0 МэВ — шесть интервалов с приблизительно логарифмическим шагом по энергии, а для протонов с энергиями от 2 до 160 МэВ и выше — восемь энергетических интервалов (таблица).

Энергетические интервалы измеряемой энергии электронов и протонов в СПЭ

№ электронного канала	E1	E2	E3	E4	E5	E6	—	—
Границы интервалов, МэВ	0,15–0,35	0,35–0,6	0,6–1,0	1,0–2,0	2,0–4,0	4,0–10,0	—	—
№ протонного канала	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Границы интервалов, МэВ	2,0–4,0	4,0–9,0	9,0–15	15–30	30–53	53–100	100–160	≥160

Полученные расчётные данные содержат информацию об энергии исходных частиц (электронов или протонов), величинах выделенной в каждом детекторе энергии с учётом потерь энергии вторичных частиц, угле падения первичной частицы относительно продольной оси прибора, а также информацию о том, прошла ли исходная частица через коллиматор прибора.

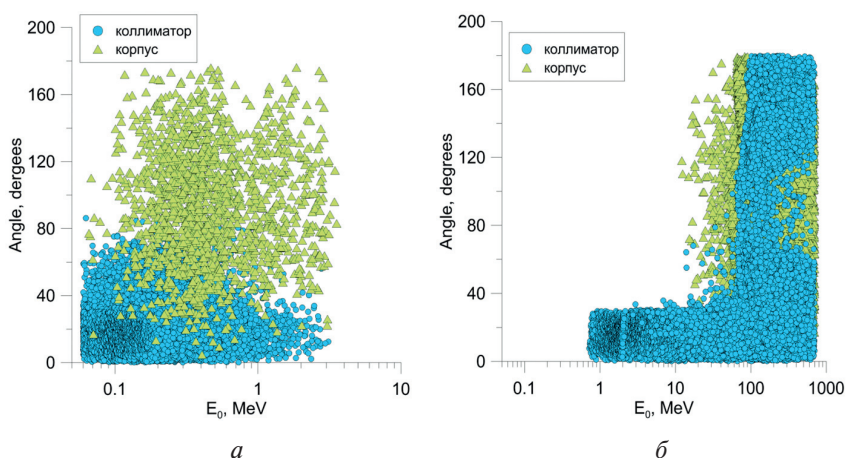


Рис. 3. Зависимость угла прилёта зарегистрированных во всех детекторах электронов (а) и протонов (б) от их исходной энергии. Разделены события от частиц, прошедших через коллиматор и через корпус прибора

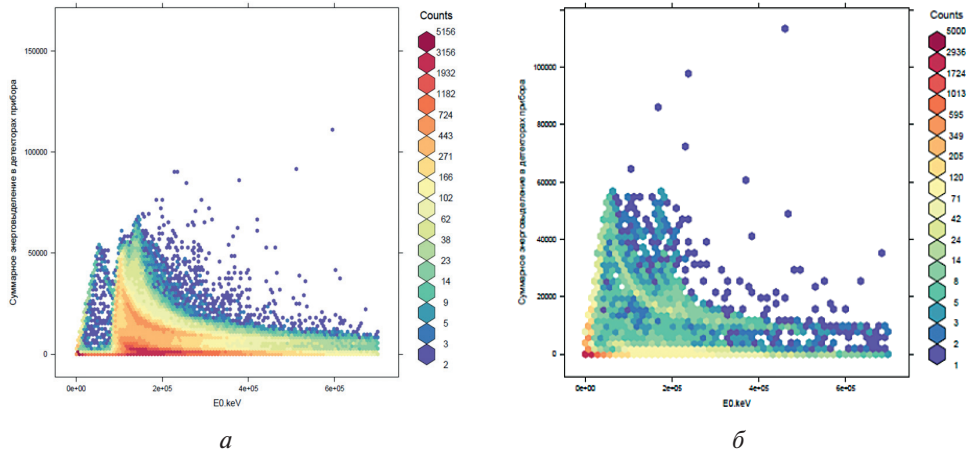


Рис. 4. Суммарное энерговыделение во всех детекторах прибора: *а* — всех протонов; *б* — прошедших через коллиматор протонов

При изотропном распределении потока падающих на прибор частиц возможна регистрация отдельными детекторами частиц, прошедших через корпус прибора. Пример полученной зависимости угла прилёта зарегистрированных во всех детекторах прибора электронов и протонов от их исходной энергии показан на рис. 3 (см. с. 147). Как видно на рисунке, возможен значительный прискёт событий из-за регистрации тормозных гамма-квантов, родившихся в корпусе прибора от первичных электронов, или из-за регистрации протонов с достаточно большими энергиями, проходящими через корпус прибора.

Определение критериев отбора событий от частиц с исходной энергией в заданном интервале проводилось с помощью метода перцентилей [Zolotarev et al., 2017]. Для этого для всех выбранных энергетических интервалов электронов и протонов (см. таблицу) построены статистические распределения по энерговыделениям dE в детекторах прибора. При этом в случае регистрации протонов для определения критериев отбора использовался массив сигналов только от первичных частиц, прошедших через коллиматор прибора (рис. 4).

Для электронов использовались только сигналы от электронов, прошедших через коллиматор и полностью остановившихся в детекторах прибора (рис. 5, см. с. 149). В данной работе использованы критерии 5–95 % и 25–75 %. Полученные критерии отбора применялись к полному массиву данных, что позволило оценить их качество.

Пример применения полученного критерия отбора 5–95 % к полному массиву данных показан на рис. 6 (см. с. 149). Здесь представлены распределения потерь энергии для протонов с энергиями в интервале от 2 до 4 МэВ во всех детекторах прибора.

Светлыми точками на рисунке обозначены частицы, прошедшие через коллиматор, а светлыми треугольными — через корпус. Тёмной рамкой показаны границы критерия отбора, а тёмными кружками — частицы, отобранные критерием. Видно, что в данном случае хорошо происходит отбор практически всех целевых частиц, а также отсеиваются частицы, прошедшие через корпус прибора.

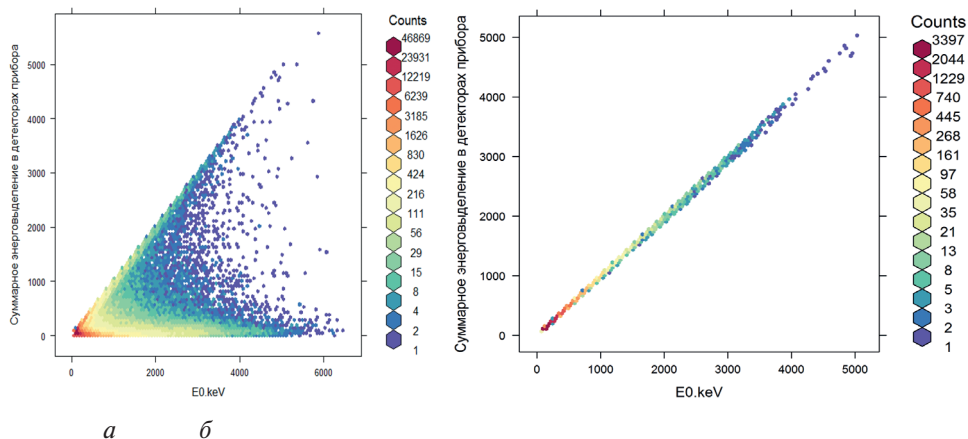


Рис. 5. Суммарное энерговыделение во всех детекторах прибора: а — всех электронов; б — прошедших через коллиматор и полностью поглощённых в детекторах электронов

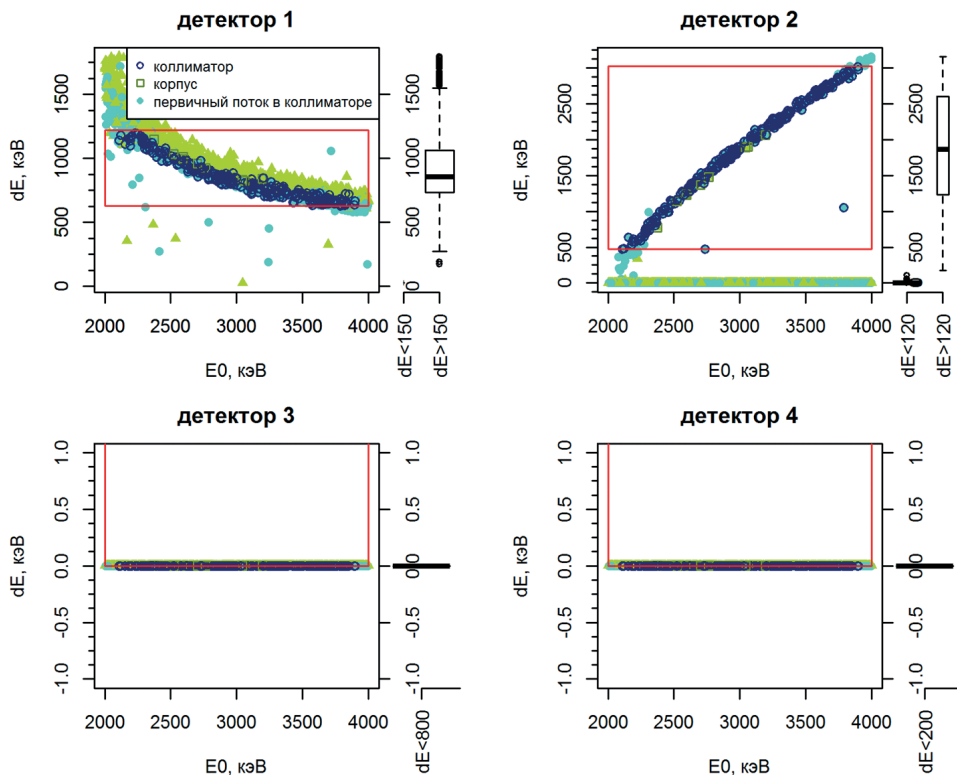


Рис. 6. Статистическое распределение по энерговыделению в детекторах прибора для энергий первичных протонов от 2 до 4 МэВ

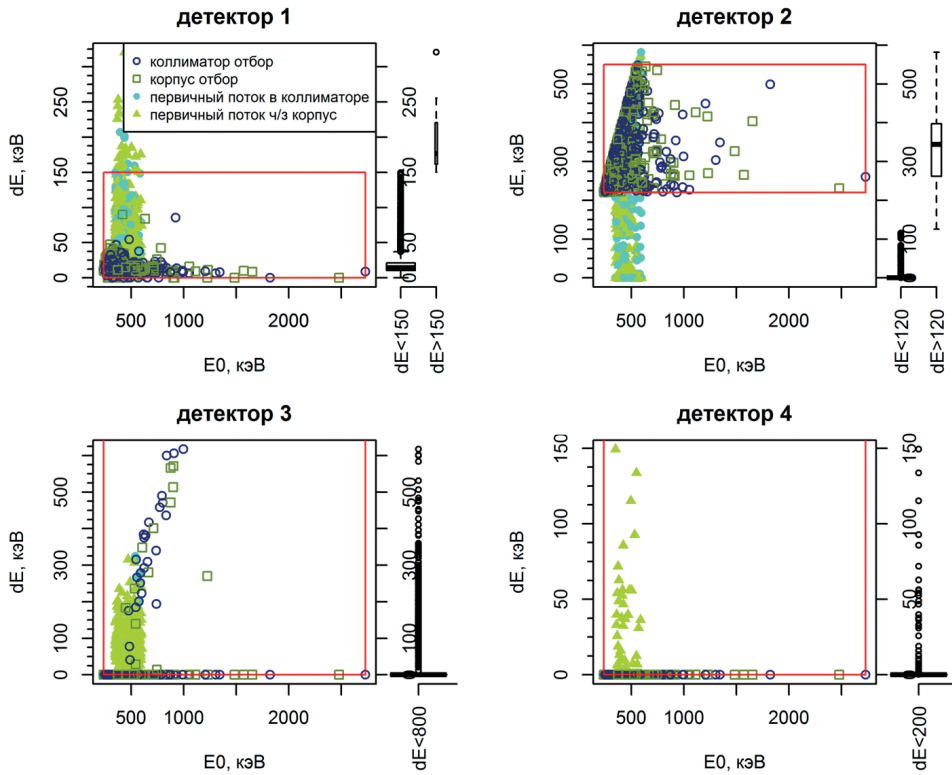


Рис. 7. Статистические распределения по энерговыделениям в детекторах прибора для энергий первичных электронов от 0,35 до 0,6 МэВ

В случае регистрации электронов отбор затруднён из-за большого разброса потерь энергии электронов. На рис. 7 видно, что при применении критерия 5–95 % к отбору электронов вместе с целевыми частицами происходит отбор частиц, прошедших через корпус прибора (тёмные квадраты на рис. 7).

В качестве основных параметров, характеризующих критерии отбора, можно использовать чувствительность и селективность данного критерия. Чувствительность определяется как доля отобранных от исходного потока частиц в данном канале энергий, а селективность характеризует правильность определения исходной энергии частицы. Рассчитанные величины чувствительности и селективности при регистрации протонов и электронов представлены на рис. 8, 9 (см. с. 151). Здесь даны результаты при использовании критериев отбора 5–95 %, 25–75 % и классической методики, основанной на определении средних потерь энергии и логических схем отбора [Власова и др., 2013].

Как видно на рис. 8, наилучшие параметры селективности наблюдаются при использовании критерия 25–75 %. Рассчитанные с применением этого критерия величины селективности для протонных каналов P1–P4 и P8 близки к 1, т. е. в этом случае практически не происходит присчёта событий из других энергетических интервалов.

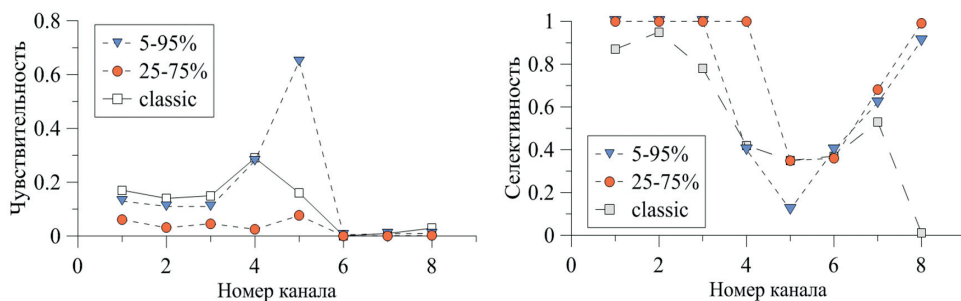


Рис. 8. Чувствительность и селективность различных критериев отбора при регистрации протонов

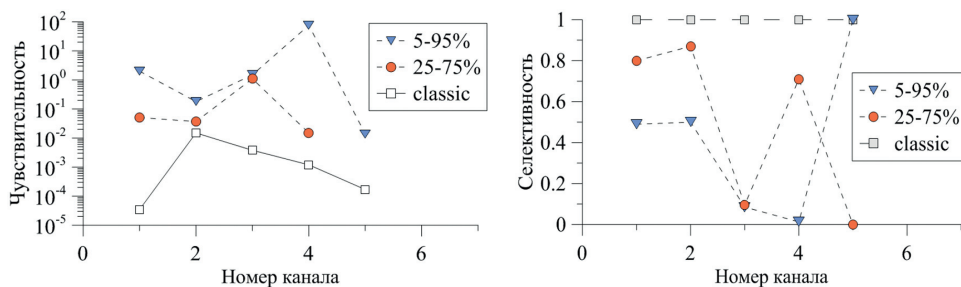


Рис. 9. Чувствительность и селективность различных критериев отбора при регистрации электронов

В случае регистрации электронов наилучшие параметры селективности наблюдаются при использовании классической методики, однако в этом случае очень низка чувствительность прибора (см. рис. 9). Учитывая ожидаемые величины потоков электронов и протонов на целевых орбитах, можно считать приемлемыми значения чувствительности выше 0,01 для протонов и выше 0,001 для электронов.

Использование критерия 25–75 % для электронов позволяет получить приемлемую селективность (на уровне 0,7–0,8) для каналов E1–E2 и E4 при более высокой, чем в классической методике, чувствительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разрабатываемая методика численного моделирования с применением комплекса программ OptimSpectrometer может быть эффективно использована для исследования телескопической системы, построенной на основе детекторов разных типов и позволяющей отдельно регистрировать потоки протонов и электронов в достаточно узких интервалах энерговыведения. Численное моделирование процессов регистрации электронов и протонов детектирующей системой даёт возможность исключить из анализа сигналы от частиц, проходящих в детекторы вне коллиматора прибора. Статистические методы обработки данных численного моделирования позволяют уточнить

критерии отбора событий, определить чувствительность и селективность отдельных энергетических каналов детектора и выбрать наилучший метод отбора.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова [Воеводин и др., 2012]. Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 18-32-00727-мол_а).

ЛИТЕРАТУРА

- [Власова и др., 2013] *Власова Н. А., Новиков Л. С., Рубинштейн И. А., Спасский А. В., Чирская Н. П.* Метрологические характеристики детекторов космического излучения // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 6. С. 32–39.
- [Воеводин и др., 2012] *Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин Вад. В.* Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // Открытые системы. 2012. № 7. С. 36–39.
- [Гальперин и др., 1972] *Гальперин Ю. И., Горн Л. С., Хазанов Б. И.* Измерение радиации в космосе. М.: Атомиздат, 1972. 343 с.
- [Гецелев и др., 2006] *Гецелев И. В., Тулупов В. И., Щербовский Б. Я.* Прибор для контроля радиационной обстановки на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. № 3–4. С. 89–91.
- [Панасюк и др., 2015] *Панасюк М. И., Подзолко М. В., Ковтюх А. С., Брильков И. А., Власова Н. А., Калегаяев В. В., Оседло В. И., Тулупов В. И., Яшин И. В.* Оперативный радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве на базе многоярусной группировки малых космических аппаратов // Космические исследования. 2015. Т. 53. № 6. С. 461–468.
- [Agostinelli et al., 2003] *Agostinelli S., Allison J., Forti A. et al.* GEANT4 — A simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. V. 506. No. 3. P. 250–303.
- [Chytracек et al., 2006] *Chytracек R., McCormick J., Pokorski W., Santin G.* Geometry Description Markup Language for Physics Simulation and Analysis Applications // IEEE Trans. Nuclear Science. 2006. V. 53. No. 5. P. 2892–2896.
- [Ivanchenko et al., 2011] *Ivanchenko V. et al.* Recent Improvements in Geant4 Electromagnetic Physics Models and Interfaces // Progress in Nuclear Science and Technology. 2011. V. 2. P. 898–903.
- [Sawyer, Vette, 1976] *Sawyer D. M., Vette J. I.* AP-8 Trapped proton environment for solar maximum and solar minimum: NASA report NSSDC/WDC-A-R&S 76-06. 1976.
- [Vette, 1991] *Vette J.* The AE-8 trapped electron model environment: NASA report NSSDC 91-24, NASA/GSFC. Greenbelt, MD, USA, 1991.
- [Whelan, 2014] *Whelan P.* AE9/AP9/SPM Model Application Programming Interface, Version 1.00.000: AFRL Report, Kirtland AFB, NM, 2012, AFRL-RV-PS-TR-2014-0018. 2014.
- [Zolotarev et al., 2017] *Zolotarev I. A., Novikov L. S., Osedlo V. I., Tulupov V. I., Chirskaya N. P.* Numerical simulation of metrological characteristics of cosmic radiation detectors // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. V. 8. No. 2. P. 222–228.

THE OPTIMSPECTROMETER TOOLCHAIN FOR THE DEVELOPMENT OF CHARGED PARTICLE SPECTROMETERS

Chirskaya N. P., Zolotarev I. A., Novikov L. S., Tulupov V. I., Osedlo V. I.

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (SINP MSU), Moscow, Russia

Charged particle spectrometers are widely used for the radiation monitoring of near-Earth space. The problem of creating a universal device for radiation monitoring is complicated because of the multicomponent nature of the ionizing radiation fluxes and the heterogeneity of the radiation conditions in the near-Earth space. During the design it is required to optimize spectrometer parameters for each target orbit of satellites.

Statistical methods of processing the simulation data allow refining the thresholds of instruments and determining the efficiency of registration in different energy channels. This approach requires a large amount of calculations due to variations in the parameters of the spectrometer, such as geometry and materials of its construction. To solve this problem, the calculation procedure and the OptimSpectrometer toolchain were developed to select and optimize energy thresholds and geometry parameters of the spectrometers.

Keywords: charged particles spectrometer, calibration, cosmic rays, event selection, mathematical simulation

Chirskaya Nalatia — research assistant, PhD, chirskaya.sinp@yandex.ru

Zolotarev Ivan — junior researcher

Novikov Lev — chief researcher, Dr. Sci., professor

Tulupov Vladimir — leading researcher, PhD

Osedlo Vladislav — deputy director, PhD

ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРИОДОВ «ВЕКОВОЙ» ГАРМОНИКИ ОТ ПРОТЯЖЁННОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ РЯДОВ ДЛЯ СТАРОЙ И НОВОЙ ВЕРСИЙ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА

А. И. Шибяев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ)

Бельгийский центр по изучению Солнца (<http://sidc.oma.be>) с июля 2015 г. ввёл новые правила подсчёта ежемесячных чисел Вольфа по которым был пересчитан классический ряд чисел Вольфа (WSN) с 1749 по июнь 2015 г. Многие исследователи скептически настроены к новой версии поскольку соответствующие характеристики циклов: максимумы, длины ветвей роста, длины циклов в классической (старой) и новой версиях различны. Отсюда следует, что и характеристики длиннопериодных циклов будут отличаться. Длиннопериодные циклы солнечной активности, в том числе цикл Гляйсберга, оказывают большое влияние на повседневную жизнь в связи с проявлением эпох максимумов и минимумов солнечной активности. В работах разных авторов, сделанных за последние 60 лет, период цикла Гляйсберга оценивается в пределах 80–110 лет. Ряд исследователей выделяют конкретное значение периода равное 88 годам [Feunman, Gabriel, 1990]. Так как разные авторы анализировали ряд чисел Вольфа различной длины, то имеет смысл исследовать влияние длины самого ряда на период аппроксимирующего синуса длиннопериодной компоненты ряда чисел Вольфа. Кроме того, разумно сравнить параметры синусов аппроксимирующих длиннопериодные составляющие новой и старой версию рядов.

Ключевые слова: числа Вольфа, солнечные циклы, аппроксимация

Напомним, что ряд среднемесячных чисел Вольфа W включает в себя регулярные инструментальные наблюдения с 1849 г. по настоящее время — достоверный ряд W_{tool} , и ряд восстановленных значений с 1749 по 1849 г. — ряд W_{rest} ($W = W_{rest}UW_{tool}$). В работе [Шибяев, 2008] при сопоставлении свойств рядов W_{rest} и W_{tool} отмечены значительные отличия в их характеристиках.

В данной работе для анализа использовались длиннопериодные компоненты $P1$ рядов W^* (сглаженный ряд ежемесячных чисел Вольфа) с 1749 г. На рис. 1 представлены зависимости для старой версии ряда.

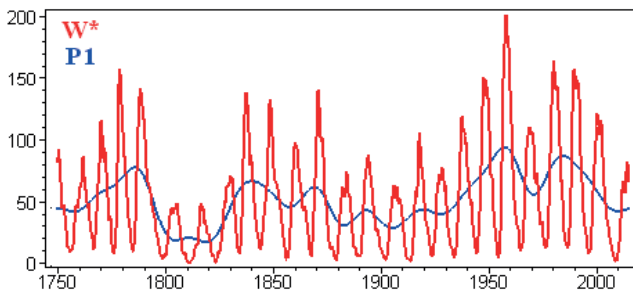


Рис. 1. Обзор сглаженного ряда чисел Вольфа и его длиннопериодной компоненты, старая версия

СИНОС-АППРОКСИМАЦИЯ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ КОМПОНЕНТ РАЗНОЙ ДЛИНЫ

На рис. 2 представлен результат аппроксимации синусом $\sin((2\pi/T) + \varphi)$ двух вариантов старой версии ряда: с 1749 по 1954.37 г. (восемнадцать циклов) и с 1749 по 2014.376 г. (до максимума 24-го цикла). Параметры синуса: период и фаза находились «методом наименьших квадратов», т.е. по минимальному значению суммы квадратов отклонения при сканировании соответствующих рядов синусом. Период тестировался в пределах 50–200 лет, фаза 0– 2π . Исследуемые ряды предварительно приводились к соизмеримому масштабу, т.е. после вычитания среднего значения нормировались на квадратный корень из дисперсии. Для первого ряда наименьшее отклонение наблюдается при периоде в 84 года, для второго в 110 лет, значения фаз при которых достигались минимумы, не указаны.

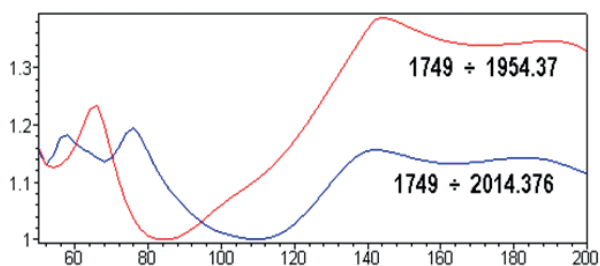


Рис. 2. Результат синус-сканирования рядов по периоду. Ось OX — период синуса в годах

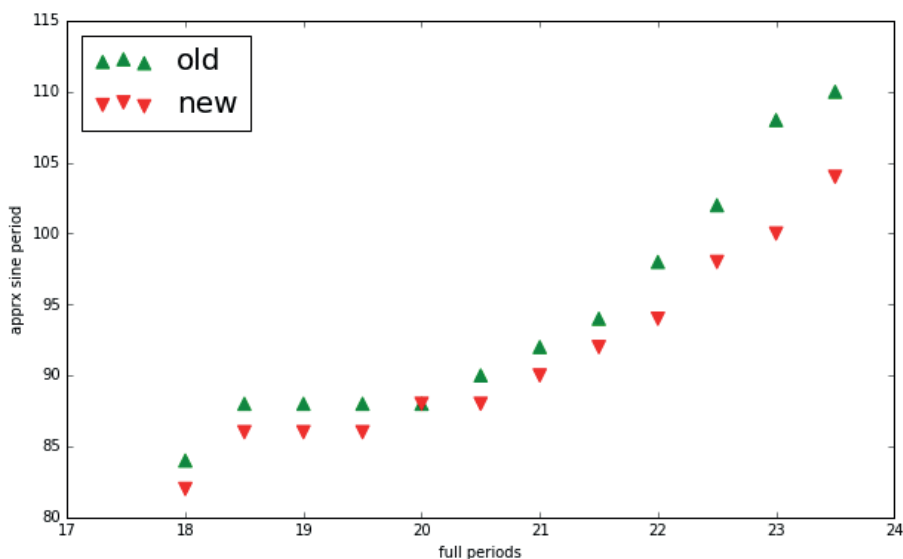


Рис. 3. Зависимость периода аппроксимирующего синуса от длины ряда. Старая и новая версии

Зависимость периода аппроксимирующего синуса (вертикальная ось в годах) от длины ряда демонстрирует рис. 3, по оси ОХ отложена длина ряда в циклах. Наиболее устойчиво значение периода равно 88 годам. Также виден заметный рост периода после 20-го цикла для обеих версий, т. е. с увеличением доли достоверных данных в рядах W . Это говорит о рассогласованности характеристик восстановленного W_{rest} и достоверного W_{tool} рядов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении проиллюстрируем степень согласованности классического ряда W с 88-летней гармоникой. Опираясь на оптимальные характеристики «частота – фаза» для ряда 1749–1968.958 гг. (до максимума цикла 20) сопоставим аппроксимирующий синус с рядом чисел Вольфа (рис. 4). Наглядно виден локальный характер проявления 88-летней гармоникой.

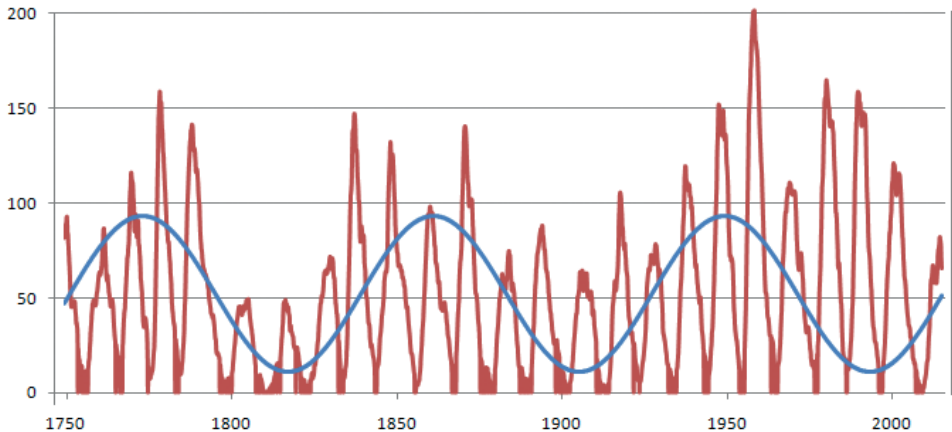


Рис 4. Сопоставление 88-летней гармоникой и ряда чисел Вольфа

В работе [Gleissberg, 1955] Гляйсберг дал оценку периода огибающей максимумы солнечных циклов ещё в 1955 г. Ряд W , на который исследователи тогда опирались, включал в себя не более 18 циклов, половина из которых относится к восстановленной части ряда чисел Вольфа, правдоподобность которой вызывает сомнения. Так как соотношение длин W_{rest} и W_{tool} влияет на величину оценки, то логично, что в работах разных исследователей и выполненных в разное время, для «вековой» компоненты ряда получались отличительные величины. Диапазон разброса этих оценок от 80–100 лет хорошо согласуется с полученными значениями в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

[Шибает, 2008] Шибает И. Г. Оценка восстановленной части ряда чисел Вольфа и возможность её коррекции // *Астрономич. вестн.* 2008. Т. 42. № 1. С. 66–74.

[Feynman, Gabriel, 1990] *Feynman J., Gabriel S. B.* Period and phase of the 88-year Solar cycle and the Maunder minimum: evidence for a chaotic Sun // *Solar Physics*. 1990. V. 127(2). P. 393–403.

[Gleissberg, 1955] *Gleissberg W.* // *Publications of the Istanbul University Observatory*. 1955. No. 57.

CONNECTION BETWEEN PERIOD OF LONG-PERIOD COMPONENT WOLF'S NUMBERS (WNS) AND LENGTH OF WOLF'S NUMBERS SERIES FOR OLD AND NEW VERSIONS OF WNS

A. I. Shibaev

Lomonosov Moscow State University (MSU)

The comparing of long-period components of Sun's activity, including Gleissberg cycle for classic and new WNS versions, are in focus of this work. The main reason is they effect daily life at the Earth, for instance minimum and maximum ages change each other. For the last 60 years, a lot of researchers have been considering that period of Gleissberg cycle is limiting with 80 and 110 yaers. Some of them consider 88 years specificaly [Feynman, Gabriel, 1990]. Different researchers were analazing WNS in different time, so they had different row length. It's make sense to analyze dependence between WNS length and period of approximation sine of low-frequency component Wolf's numbers. Presence of 2 different WNS versions also makes sense to compare results for each version among them.

Monthly Wolf number since 1749 is analyzed, the shortest part of WNS includes 18 cycles (since 1749 – till 1954.37) and the longest line includes a part of a cycle number 24 (1749–2014.376). It's noticed that during incrising WNS's lenght, sine approximation period also increases from 84 years up to 110 years. 88-years period appears at several condisions.

Because of increasing period of approximation sine it's rather difficult to extropolate sine at the future time. It should be noticed that in case of analyzing part of WNS since 1849–2015 a reliable part, period of sine approximation equals 150 years. The problem concerning mathcing reliable part of WNS and reconstricted part remains open.

Keywords: Wolf's numbers, solar cycles, approximation

Shibaev Alexander Igorevich — post-graduate student, alexshibaev@yandex.ru

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛУНЫ: ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕГО ПОКРОВА

В. В. Юшков^{1,2}, О. В. Юшкова¹

¹ Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН (ФИРЭ), Фрязино, Россия

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), физический факультет, Москва, Россия

На основе анализа имеющихся в литературе результатов лабораторных измерений диэлектрических характеристик образцов лунного грунта, доставленных на Землю в ходе миссий «Луна» и Аполло, разработана электрофизическая модель верхнего покрова Луны.

Ключевые слова: радиолокация, Луна, подповерхностный слой, комплексная диэлектрическая проницаемость, моделирование

Изучение Луны было и ещё долгие годы будет актуальным направлением космических исследований. В окололунном пространстве уже в этом веке побывали космические корабли Америки, Европы, Китая, Индии и Японии. Россия тоже анонсировала старт проекта «Луна-Ресурс», в рамках которого планируется запуск двух космических аппаратов: одного посадочного и одного орбитального. Цель программы состоит в исследовании верхнего слоя грунта Луны. Поэтому основной интерес представляет изучение строения верхнего покрова этого тела, минералогического состава, разведка и картографирование полезных ресурсов и поиск районов с подповерхностными пустотами. С решением всех этих задач успешно справляется радиолокация. Для планирования радиолокационных экспериментов, прогнозирования их результатов и последующей обработки необходимо уметь численно моделировать процесс зондирования. Соответственно, ключевым моментом моделирования является разработка электрофизической модели грунта Луны.

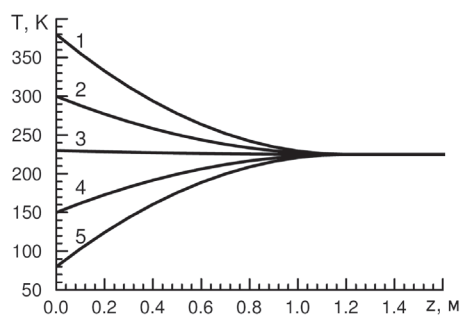


Рис. 1

Надо отметить, что о грунте Луны известно достаточно много. На Луне нет атмосферы, поэтому ночью температура на поверхности опускается до 80 К, а днём подымается до 380 К. Температура верхнего слоя грунта зависит от температуры на поверхности. На рис. 1 приведены графики изменения температуры грунта Луны. По горизонтальной оси — глубина, по вертикальной — температура. Это результаты моделирования, полученные специалистами ГЕОХИ РАН [Маров и др., 2010]. Согласно

Юшков Вячеслав Владиславович — техник, студент 2-го курса физического факультета, iushkov.vv16@physics.msu.ru

Юшкова Ольга Вячеславовна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

их оценке, термическому воздействию подвержен тонкий слой (1–2 м), грунт ниже 2 м имеет постоянную температуру, около 220 К.

Контактные и дистанционные исследования показывают, что приповерхностный слой грунта Луны имеет ярко выраженную слоистую структуру. Твёрдые коренные породы, такие же как на Земле, образуют тело Луны. Тёмные породы — базальты и гнейсы — слагают моря, из светлых — анортозитов — сложены горы. За счёт градиента температур верхние породы разрушены до обломочно-пылевой фракции. Из-за обогащения оседающей пылью и взаимодействия с космическим излучением образовалась новая порода, аналога которой на Земле нет. Эта порода называется реголит. Толщина реголита в нашей модели составляет от 3 до 5 метров, что соответствует измерениям георадара, находившегося на луноходе Yutu, который был доставлен космическим аппаратом Chang'e 3 [Xiao et al., 2015].

В ходе миссий «Луна» и Apollo на Землю доставлено 300 кг лунного грунта из девяти посадочных мест. Многие из них подвергнуты лабораторным исследованиям. Диэлектрические параметры образцов измерялись во многих лабораториях [Heiken et al., 1991]. Большинство исследований проведено на частоте 450 МГц, в небольшой серии работ рассмотрен частотный диапазон от 0,1 до 10 МГц, единичные измерения выполнены на частоте около 10 ГГц. Нашей задачей была аппроксимация этих измерений для расчёта ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ для разных частот радиодиапазона. Образцов грунта, у которых исследовались бы диэлектрические параметры в нескольких частотных диапазонах, всего оказалось семь. Результаты измерений подтверждают гипотезу, что грунт Луны является диэлектриком. В земных условиях похожими свойствами обладают технические алюмосиликатные диэлектрики, электрофизические свойства которых хорошо изучены. Согласно теории диэлектриков действительная часть диэлектрической проницаемости практически для всех частот постоянна, за исключением области дисперсии. Тангенс угла потерь диэлектрика зависит от частоты несколько сложнее. На низких частотах потери связаны с проводимостью, на высоких — с поляризуемостью. Была разработана методика, которая позволила аппроксимировать лабораторные измерения формулой Сканави, адекватно описывающей изменения диэлектрической проницаемости реголита в зависимости от частоты и температуры [Юшкова, Кибардина, 2017]. В результате численного моделирования оказалось, что геологически однородный слой реголита, лежащий на геологически однородной подложке из коренной породы, имеет сложный глубинный профиль диэлектрических характеристик, который зависит от частоты зондирующего радиосигнала и от температуры на поверхности и, следовательно, от зенитного угла Солнца. На рис. 2 (см. с. 160) показаны результаты расчёта глубинного распределения диэлектрической проницаемости ϵ' (*слева*) и тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ (*справа*) верхнего слоя грунта Луны, выполненные для частот 1 МГц (линия 1) и 1 ГГц (линия 2) при температуре на поверхности: а) 80 К и б) 380 К. Из расчётов следует, что изменение плотности реголита по глубине не существенно влияет на глубинное распределение диэлектрических характеристик, в отличие от изменения температурного режима.

На рис. 3 (см. с. 160) приведена частотная зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитных волн в радиодиапазоне, рассчитанная для четырёх разных температур на поверхности. Из анализа серии расчётов

следует, что радиоволны с частотой до 1 МГц отражаются от коренных пород, реголит для них прозрачен. Радиоволны с частотой от 1 до 100 МГц чувствуют наличие реголита, что проявляется в осцилляциях коэффициента отражения. Период осцилляций зависит от толщины реголита, значение минимумов и максимумов — от диэлектрических характеристик коренных пород и реголита. Отражение этих волн не чувствительно к изменению температуры. Радиоволны из области 4 отражаются преимущественно от поверхности реголита и коэффициент отражения связан с температурной зависимостью диэлектрической проницаемости. Радиоволны из 3-го диапазона наиболее информативны для исследования реголита, поскольку коэффициент отражения зависит от его плотности поляризуемости пород и их температурного профиля. При зондировании грунта на этих частотах подготовка радиолокационных экспериментов требует особенного внимания к численному моделированию с учётом всех априорных данных о грунте Луны.

Работа выполнена при поддержке Программы № 28 фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук «Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

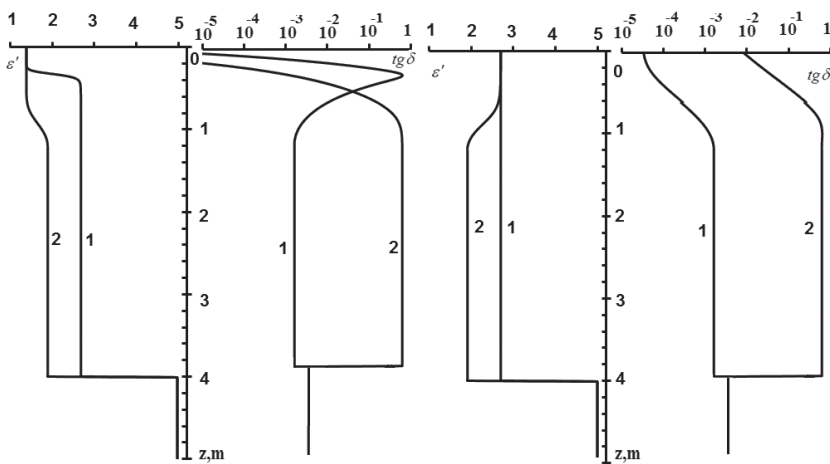


Рис. 2

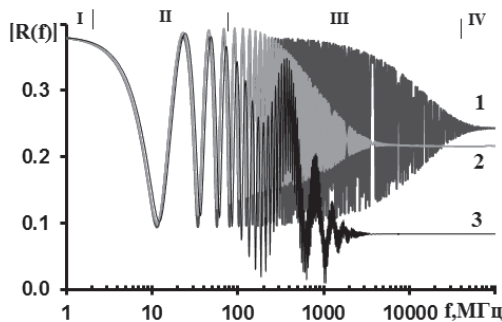


Рис. 3

ЛИТЕРАТУРА

- [Маров и др., 2010] *Маров М. Я., Колесниченко А. В., Мануйлов К. К., Осипов В. П.* Эксперимент ТЕРМОФОб: Прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса // *Астроном. вестн.* 2010. Т. 44. № 5. С. 393–402.
- [Юшкова, Кибардина, 2017] *Юшкова О. В., Кибардина И. Н.* Диэлектрические свойства верхнего покрова Луны // *Астроном. вестн.* 2017. № 2. С. 136–141.
- [Heiken et al., 1991] *Heiken G., Vaniman D., French B. M.* Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press, 1991. 736 p.
- [Xiao et al., 2015] *Xiao L., Zhu P., Fang G.* et al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission // *Science.* 2015. V. 347. Iss. 6227. P. 1226–1229.

RADIO SOUNDING OF MOON: ELECTROPHYSICAL MODEL OF THE UPPER COVER

V. V. Yushkov^{1,2}, O. V. Yushkova¹

¹ Fryazino Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

² Lomonosov Moscow State University (MSU), Faculty of Physics

Based on the analysis of the available in the literature results of laboratory measurements of the dielectric characteristics of lunar soil samples delivered to the Earth during the Luna and Apollo missions, the electro-physical model of the upper layer of the lunar soil was developed.

Keywords: radar, the Moon, subsurface, complex dielectric permittivity, simulation

Yushkov Vyacheslav Vladimirovich — technician, iushkov.vv16@physics.msu.ru

Yushkova Olga Vyacheslavovna — Senior Researcher, PhD

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Бусарев В. В., Полоюшкина Д. К., Зиманова А. Л.</i> Сравнение спектров комет C/1999 S4 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT), 67P/ Чурюмова – Герасименко и возможные отличия в составе их вещества	5
<i>Быков С. Д., Филиппова Е. В., Мереминский И. А., Семена А. Н.</i> Исследование кандидата в чёрные дыры GRS1739-278 во время вспышки 2014 года	19
<i>Климов Д. И., Мамедов Т. Т., Косарев Д. И.</i> Система видеоконтроля для эксплуатации на ракетах-носителях	31
<i>Кронрод Е. В., Matsumoto К., Кусков О. Л., Кронрод В. А.</i> Влияние температурного режима Луны на состав мантии и сейсмические скорости.	37
<i>Кузнецова Е. А., Кривонос Р. А.</i> Мониторинг нетеплового излучения звёздного скопления Арки в центре Галактики по данным обсерваторий NuSTAR и XMM-Newton	47
<i>Ломакин А., Федорова А. А., Кораблев О. И., Монтмессан Ф., Воронин Б. А.</i> Спектры CO ₂ льда высокого разрешения на Марсе по данным СПИКАМ/«Марс-Экспресс»: сравнение с лабораторными измерениями	61
<i>Николаев П. Н.</i> Метод реконструкции электронной концентрации в ионосфере по схеме регистрации данных спутник – спутник	73
<i>Русских И., Шиховцев А., Чупраков С., Киселев А., Томин В., Скоморовский В., Ковадло П., Лукин В., Колобов Д.</i> Расчёт системы адаптивной оптики для Большого солнечного вакуумного телескопа	81
<i>Сазонов В. В., Егоров М. В., Морозов О. В., Романенко Т. Е., Самыловский И. А., Семёнов А. Н.</i> Масштабируемый программный комплекс для интерактивного моделирования и отображения состояния наземного и орбитального сегмента спутниковой группировки	89
<i>Сазонов В. В., Егоров М. В., Морозов О. В., Мухамеджанов И. Д., Сазонова С. В., Самыловский И. А., Сапелкин А. С.</i> Масштабируемый комплекс программных средств автоматизированного управления антенной в составе наземного сегмента группировки спутников ДЗЗ	96

<i>Сербинов Д. В., Семена Н. П.</i> Влияние факторов космического пространства на проведение астрофизических экспериментов на борту орбитальных станций	107
<i>Сергиенко М. В., Соколова М. Г.</i> О взаимосвязи околоземных астероидов с кометно-метеороидным комплексом.	120
<i>Собьянин Д. Н.</i> Джет в джете в галактике М87	128
<i>Худышев Ю. С., Стрелков Г. М.</i> Прямоугольный радиоимпульс с фрактальной фазой на межпланетной трассе	133
<i>Чирская Н. П., Золотарев И. А., Тулупов В. И., Новиков Л. С., Оседло В. И.</i> Система программ OptiSpectrometer для разработки спектрометров энергичных заряженных частиц	144
<i>Шибяев А. И.</i> Зависимость периодов «вековой» гармоник от протяжённости исследуемых рядов для старой и новой версий ряда чисел Вольфа	154
<i>Юшков В. В., Юшкова О. В.</i> Радиолокационное зондирование Луны: электрофизическая модель верхнего покрова	158

055(02)2

ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 20.08.2018

Заказ 4170

Формат 70×100/16

Тираж 100

13,33 усл.-печ. л.