

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ХIII КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ
КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**
13–15 апреля 2016 года, ИКИ РАН, Москва

СБОРНИК ТРУДОВ

Под редакцией
А.М. Садовского

Серия «Механика, управление и информатика»

МОСКВА
ИКИ РАН
2016

**The 13th Young Scientists Conference
“Fundamental and Applied Space Researches”**

IKI RAN, Moscow, April 13–15, 2016

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

The 13th Young Scientists Conference “Fundamental and applied space research” dedicated to the Cosmonautics Day, took place on 13–15 April, 2016, at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (web site of the conference <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 more than 100 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.

**13-я Конференция молодых учёных
«Фундаментальные и прикладные космические исследования»**

ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2016 г.

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

13–15 апреля 2015 г. в ИКИ РАН состоялась XIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (интернет-сайт конференции <http://kmu.cosmos.ru>), посвящённая Дню космонавтики. Конференция проводилась Научно-образовательным центром ИКИ РАН. В конференции принимали участие студенты, аспиранты и молодые учёные (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. В очередной раз конференция стала самым крупным молодежным форумом, посвящённым космической физике. За три напряженных дня работы было представлено более 100 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: *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

13–15 апреля в Федеральном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) проходила ежегодная Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (КМУ), посвящённая Дню космонавтики, которая проводилась Научно-образовательным центром ИКИ РАН. Сайт конференции — <http://kmu.cosmos.ru>. В конференции принимали участие студенты, аспиранты и молодые ученые (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. Председатель программного комитета — академик РАН, директор ИКИ РАН Л. М. Зеленый, председатель организационного комитета — заведующий Научно-образовательным центром ИКИ РАН А. М. Садовский.

К сожалению, в этом году Конференция не была поддержана ни одним грантовым фондом. Несмотря на это, в 2016 г. в конференции было представлено более 100 докладов, что в очередной раз сделало её самым крупным молодежным форумом, посвящённым космическим исследованиям. Основные направления конференции: физика атмосферы Земли и планет, гидросфера и литосфера Земли и планет, метеоритные тела и астероиды, астрофизика и радиоастрономия, физика солнечной системы, теория и математическое моделирование, баллистика, космическое приборостроение, дистанционное зондирование Земли и планет.

В 2016 г. исполнилось 30 лет со времени сближения автоматических космических комплексов «ВЕГА-1» и «ВЕГА-2» с кометой Галлея. Поэтому было решено не организовывать традиционные лекции, а в честь этого события сделать пленарную сессию, открывшую конференцию, на которой выступили люди, тесно связанные с созданием и реализацией проекта.

Поскольку цель конференции — приобретение молодыми учёными опыта публичных выступлений, обсуждения своих результатов, то на ней нет стендовых докладов, все доклады только устные. Три дня конференции дают молодежи пообщаться с коллегами, узнать об иных подходах и методах исследований, что может привести к постановке междисциплинарных задач, к развитию новых научных связей. Такое общение может оказаться полезным для получения новых молодежных грантов, которые периодически объявляются различными фондами.

Хотя конференция давно получила статус международной, рабочим языком остается русский. Поскольку в КМУ участвуют студенты, аспиранты и молодые учёные, то регистрационного взноса не предусматривается, а все организационные расходы в 2016 г. были взяты на себя ИКИ РАН.

Мы приглашаем к участию в наших мероприятиях всех интересующихся космическими исследованиями, а всю информацию о проводимых мероприятиях можно найти на сайте нашего института www.cosmos.ru.

Программный комитет конференции

- Зеленый Лев Матвеевич, д-р физ.-мат. наук, акад. РАН, ИКИ РАН
- Садовский Андрей Михайлович, канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН
- Петрукович Анатолий Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, чл.-кор. РАН
- Бескин Василий Семёнович, д-р физ.-мат. наук, Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН (ФИАН)

- Родин Александр Вячеславович, канд. физ.-мат. наук, Московский физико-технический институт (государственный университет) (МФТИ)
- Измоденов Владислав Валерьевич, д-р физ.-мат. наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
- Бессонов Роман Валерьевич, канд. тех. наук, ИКИ РАН
- Барталёв Сергей Александрович, д-р тех. наук, ИКИ РАН

Организационный комитет

- Садовский Андрей Михайлович, канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН — председатель орг. комитета
- Зимовец Иван Викторович, канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН
- Человеков Иван Васильевич, канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН
- Беляев Денис Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН
- Бессонов Роман Валерьевич, канд. тех. наук, ИКИ РАН
- Измоденов Владислав Валерьевич, д-р физ.-мат. наук, МГУ имени М. В. Ломоносова
- Кузичев Илья Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН
- Антоненко Елена Александровна, ИКИ РАН

А. М. Садовский,
заведующий Научно-образовательным центром ИКИ РАН.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ВЫЯВЛЕНИЯ ПОЖАРОВ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

Н. Н. Бардаков¹, В. В. Растоскуев²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)

² Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (ИНЗ СПбГУ)

Пожары относятся к одному из основных опасных природных, а в последнее время природно-техногенных катастрофических процессов, влияющих на эколого-экономическое состояние значительных территорий. Так, в России, в активно охраняемом лесном фонде, ежегодно насчитывается 12...36 тыс. лесных пожаров, охватывающих площадь от 0,5 до 2,1 млн га лесных земель, площадь гарей примерно в пять раз превышает площадь вырубок [Глаголев, 2015]. Согласно статистике Минлесхоза средний размер ущерба от пожаров составляет 1350 миллионов рублей в год. Большую популярность получили методы выявления пожаров с использованием спутниковых снимков. Данный факт и обосновывает актуальность выбранной темы.

Целью данного исследования стал обзор существующих методик выявления пожаров по спутниковым снимкам.

Алгоритмы на основе яркостной температуры. Существует два типа алгоритмов выявления пожаров: алгоритм фиксированных порогов (АФП) и контекстуальные алгоритмы (КА). АФП используют эмпирически определённые пороговые значения для распознавания пикселей с пожарами. Большинство АФП включает три основных этапа: 1) использование среднего инфракрасного (ИК) канала для идентификации всех потенциальных пожаров; 2) использование теплового ИК для отсеивания пикселей с облаками; 3) вычисление разницы между яркостной температурой ранее использованных каналов для отсеивания пикселей с тёплым фоном [Akhoundzadeh et al., 2006]. КА используют динамические подходы, основанные на различиях пикселей потенциальных пожаров и пикселей фона. Как правило, КА включают три основных этапа: 1) предварительно определённые пороговые значения, которые направлены на выявление потенциальных пожаров; 2) контекстуальные тесты, которые определяют пиксели потенциальных пожаров; 3) пороговые значения, отсеивающие ложные сигналы [Argino, Melinotte, 1988].

Выводы. Использование возможностей дистанционного зондирования имеет смысл при решении комплексных задач, связанных с выявлением и контролем динамики пожаров, а также оценкой их энергетических параметров.

Сканер, установленный на MODIS, наряду с AVHRR, имеет невысокое пространственное разрешение, однако большой набор спектральных каналов и широкая полоса обзора сделали эти датчики самыми распространёнными источниками получения радиометрических данных.

В настоящее время реализован алгоритм автоматического выявления пожаров по снимкам MODIS—MOD14. Однако пороговые значения, используемые в этом алгоритме, не учитывают региональные особенности местности, что может приводить к существенному занижению вероятности обнаружения пожара на территории азиатской части России. Таким образом, остаётся открытым вопрос выявления пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока. Исходя из данных соображений, необходимо модифицировать пороговые значения, сделав возможным их применение на указанной территории.

Ключевые слова: выявление, алгоритм, яркостная температура, спутниковые снимки, пожары, отражение.

Бардаков Николай Николаевич — аспирант, murmakil@mail.ru

Растоскуев Виктор Васильевич — профессор, доктор технических наук

ВВЕДЕНИЕ

Пожары растительности являются одним из доминирующих факторов, определяющих породную и возрастную структуру бореальных лесов, их ресурсный и экологический потенциал, оказывающих разрушительное воздействие на почвенный покров и фауну, вызывающих повреждение почв и их эрозию, изменяющих состав нижних слоёв атмосферы. Они относятся к одному из основных опасных природных, а в последнее время природно-техногенных катастрофических процессов, влияющих на эколого-экономическое состояние значительных территорий. Так, в России, в активно охраняемом лесном фонде, ежегодно насчитывается 12...36 тыс. лесных пожаров, охватывающих площадь от 0,5 до 2,1 млн га лесных земель, площадь гарей примерно в пять раз превышает площадь вырубок [Глаголев, 2015]. Согласно статистике Минлесхоза средний размер ущерба от пожаров составляет 1350 миллионов рублей в год и это без учёта затрат на ликвидацию возгораний.

Только своевременное обнаружение пожаров поможет сократить площадь, пройденную огнём, а также уменьшить затраты, связанные с тушением возгораний. Однако регулярное патрулирование территории — это довольно затратный способ. В связи с этим большую популярность получили методы выявления пожаров с использованием спутниковых снимков. Данный факт и обосновывает актуальность выбранной темы.

Целью данного исследования является обзор существующих методик выявления пожаров по спутниковым снимкам.

1. РАДИОМЕТРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОЖАРОВ

Сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) — одна из систем, применяемая для выявления территорий с активными пожарами в лесах в последние годы. Этот сенсор запущен с 1999 г. на платформе научно-исследовательского спутника Terra, а с 2002 г. — на платформе Aqua. Одно из достоинств сенсора — его снимки отображают территории с активными пожарами в разрешении 1×1 км. Данная гиперспектральная система используется как эффективный инструмент противопожарного контроля в лесах [Saeedeh et al., 2015].

Американские учёные использовали алгоритм выявления пожаров на продуктах сенсора MODIS. Основная структура данного алгоритма — это выявление пожаров на основе абсолютных и относительных пределов температуры в наиболее чувствительных диапазонах [Giglio et al., 1999]. В тепловизоре MODIS наиболее чувствительным диапазоном к изменению температуры является 3,9 мкм [Saeedeh et al., 2015].

Много исследователей изучали выявление пожаров в лесах по всему миру с помощью системы MODIS исходя из важности их своевременного обнаружения и предотвращения. Они использовали спутниковые снимки для анализа пространственной и временной структуры пожаров. Так, иранские учёные проводили пространственный и временной анализ произошедших пожаров. Далее они исследовали возникновение пожара в зависимости от осадков, рельефа и нормализованного относительного индекса растительности

(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [Sarkargar Ardakani, Valedanzodj, 2011].

Их коллеги провели работу по моделированию распространения пожара. Они изучали данную тенденцию по таким показателям, как земной покров, данные топливной карты, направление и скорость ветра. Результаты работы показали, что представленная система может быть использована в качестве системы поддержки решения во время возникновения пожара при условии доступности соответствующей базы данных [Akhoundzadeh et al., 2006].

Учёные из Финляндии совместно с бразильскими учёными определили территорию с высоким риском возникновения пожаров по произошедшим пожарам. Далее они выявили активные пожары на территории исследования. Результаты показали корреляцию, равную 0,84, между произошедшими пожарами и пожарами в данный момент [Maeda et al., 2011].

Пуэшакури Элладех (Poorshakoori Allahdeh F.) и его коллеги исследовали возможность выявления пожара в национальном парке, используя данные дистанционного зонда MODIS. Координаты «горящей» территории в 57 га засняты с помощью GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования). В работе использованы снимки тепловизоров MODIS спутников Terra и Aqua за день до пожара, во время пожара и после пожара. Результаты показали возможность выявления пожара с помощью спутникового тепловизора Aqua, а не Terra [Poorshakori Allahdeh et al., 2011].

Учёный из Кореи показал роль тепловизора спутника ENVISAT в отслеживании переноса огромных дымовых шлейфов, появившихся в результате лесных пожаров в Канаде [Chung, 2002], в то время как немецкие исследователи обсуждали возможности этого спутника по выявлению дымовых шлейфов. Дымовые шлейфы и их перемещение можно проследить с помощью временного спутникового тепловизора посредством обработки снимков [Huang, Siegert, 2004].

В недалёком прошлом значительные усилия были направлены на автоматизацию процесса распознавания дыма на спутниковом снимке. Некоторые из этих методов подразумевают использование искусственных нейронных сетей и пороговых значений, применяемых к AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) снимкам. Другие методы основаны на способе классификации многодиапазонных порогов. Например, алгоритм автоматического выявления дыма и аэрозолей (Automated Smoke/Aerosol Detection Algorithm, ASADA), применяется к снимку геостационарного эксплуатационного спутника наблюдения за окружающей средой 8-го поколения (Geostationary Operational Environment Satellite, GOES) для отображения горения биомассы в Южной Америке [Bipasha, Pal, 2009].

Инновационная методология выявления на снимках AVHRR дымовых шлейфов, вызванных технологическими авариями, была разработана греческими специалистами [Chrysoulakis, Cartalis, 2003]. Они использовали видимый, ближний инфракрасный и тепловой ИК (11,5...12,5 мкм) каналы. Полученное изображение позволило отличить на снимке дымовые шлейфы от облаков и подстилающей поверхности. На данном псевдоканальном снимке для каждого пикселя рассчитывали значение индекса загрязнения CLD в диапазоне от 0 до 1. Кроме того, рассчитывалось значение NDVI. Для проверки своего алгоритма они накладывали полученные значения CLD и NDVI в систему координат

(x ; y), получив, таким образом, диапазоны значений, характерные для воды, облаков или дымовых шлейфов.

2. АЛГОРИТМЫ НА ОСНОВЕ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Существует два типа алгоритмов выявления пожаров: алгоритм фиксированных порогов (АФП) и контекстуальные алгоритмы (КА). Первый тип применяется при исследовании региональных территорий, а второй — при исследовании территории с изменяющимися условиями. Алгоритмы фиксированных порогов, как правило, основаны на предварительно установленных абсолютных пороговых значениях и рассматривают только один пиксель одновременно. Между тем, при использовании контекстуальных алгоритмов рассчитывают относительные пороговые значения на основе статистических данных, полученных от соседних пикселей.

Алгоритмы фиксированных порогов используют эмпирически определённые пороговые значения для распознавания пикселей с пожарами. Большинство АФП включает три основных этапа: 1) использование среднего ИК-канала для идентификации всех потенциальных пожаров; 2) использование теплового ИК для отсеивания пикселей с облаками; 3) вычисление разницы между яркостной температурой ранее использованных каналов для отсеивания пикселей с тёплым фоном. С помощью АФП идентифицируют пожары в различных биомах, таких как тропические леса, саванны и бореальные леса. Фланниган М. Д. (Flannigan M. D.) и Вондэ Хаа Т. Х. (Vonder Haar T. H.) первыми использовали алгоритм пороговых значений для мониторинга пожаров в бореальных лесах Канады [Flannigan, Vonder Haar, 1986]. В своём исследовании они применяли спутниковые снимки NOAA-7 AVHRR и следующие пороговые значения: (1) $T_3 > \bar{T}_{3b}$, (2) $T_4 > \bar{T}_{4b}$ и (3) $\Delta T_{34} > 10$ К — в дневное время и $\Delta T_{34} > 8$ К — в ночное время, где $\Delta T_{34} = T_3 - T_4$; T_3 и T_4 — яркостная температура в AVHRR-каналах 3 и 4, соответственно; \bar{T}_{3b} и \bar{T}_{4b} — среднее арифметическое T_3 и T_4 пикселей фона [Flannigan, Vonder Haar, 1986].

Кауфман Й. Дж. (Kaufman Y. J.) с коллегами [Kaufman et al., 1990] предложил алгоритм на основе пороговых значений для идентификации пожаров в тропических лесах Бразилии. Он использовал спутниковые снимки сенсора AVHRR (NOAA-9) и яркостную температуру в 4-м канале для отсеивания облаков с высоким отражением. Пиксель классифицировали как пожар, если он удовлетворяет следующим критериям: (1) $T_3 \geq 320$ К, (2) $\Delta T_{34} \geq 10$ К, и (3) $T_4 > 250$ К. Первый критерий позволяет выявить пиксели с потенциальными пожарами, второй — отсеять пиксели с тёплым фоном и третий — для исключения облаков с высокой отражательной способностью [Kaufman et al., 1990].

Кеннеди П. Дж. (Kennedy P. J.) с коллегами [Kennedy et al., 1994] провёл исследование по улучшению вышеупомянутой методики для мониторинга пожаров в саваннах Западной Африки, используя спутниковые снимки AVHRR (NOAA-11). Он ввёл пороговое значение коэффициента отражения в AVHRR-канале 2 (R_2), которое позволяет отсеять пиксели, представляющие высоко отражающую поверхность. В соответствии с данным алгоритмом пожары идентифицируются по четырём критериям: (1) $T_3 \geq 320$ К, (2) $\Delta T_{34} \geq 15$ К, (3) $T_4 > 295$ К и (4) $R_2 \leq 0,16$ [Kennedy et al., 1994].

Фраанка Дж. Р. А. (Franca J. R. A.) с коллегами [Franca et al., 1995] тоже занимались выявлением пожаров в саваннах и тропических лесах Западной Африки по снимкам AVHRR спутника NOAA-11. Они предложили использовать разницу между яркостной температурой AVHRR-каналов 4 и 5 для отсеивания тонких перистых облаков. Кроме того, отражение в AVHRR-канале 1 (R_1) позволило исключить поверхности с высоким отражением. Их алгоритм основывается на следующих пороговых значениях: (1) $T_3 \geq 320$ К, (2) $\Delta T_{34} \geq 15$ К, (3) $T_4 > 287$ К, (4) $0 \leq \Delta T_{45} \leq 5$ К и (5) $R_1 \leq 0,09$, где $\Delta T_{45} = T_4 - T_5$ [Franca et al., 1995].

Ли З. (Li Z.) с коллегами [Li et al., 1997] на основе алгоритма Кауфмана проводил мониторинг пожаров в бореальных лесах Канады по спутниковым снимкам AVHRR (NOAA-11). В результате исследования было выявлено, что солнечные блики приводят к ложным сигналам, вследствие зеркального отражения солнечного излучения от озёр, рек и болот на изучаемой территории. Это обстоятельство исключило рассеяние из дальнейшего рассмотрения. Пиксель с пожаром идентифицировался по трём условиям: (1) $T_3 \geq 316$ К, (2) $\Delta T_{34} \geq 10$ К, (3) $T_4 > 245$ К [Li et al., 1997].

Итальянские учёные в своей работе ввели абсолютную разницу отражений AVHRR-каналов 1 и 2 ($|R_1 - R_2|$). Это позволило исключить ложные сигналы из-за солнечных бликов. Пожары идентифицировались по набору таких условий: (1) $T_3 \geq 320$ К, (2) $\Delta T_{34} \geq 15$ К, (3) $T_4 > 245$ К, (4) $R_1 \leq 0,25$ и (5) $|R_1 - R_2| > 0,01$ [Arino, Melinotte, 1988].

Несколько лет спустя Ли продолжил свои исследования, используя данные AVHRR спутника NOAA-14. Его модифицированный алгоритм включает пять этапов: (1) $T_3 > 315$ К — выявление пикселей потенциальных пожаров; (2) $\Delta T_{34} \leq 14$ К — отсеивание пикселей тёплой фоновой поверхности; (3) $T_4 < 260$ К — исключение облаков с высокой отражательной способностью; (4) $R_1 \geq 0,22$ — отсев ложных сигналов, вызванных облаками и подстилающей поверхностью; (5) $\Delta T_{45} \geq 4,1$ К или $\Delta T_{34} < 19$ К — исключение ложных сигналов, вызванных тонкими перистыми облаками и тёплым фоном [Li et al., 2000а, б].

Контекстуальные алгоритмы используют динамические подходы, основанные на различиях пикселей потенциальных пожаров и пикселей фона. Данные алгоритмы являются более гибкими и эффективными при изменчивых условиях подстилающей поверхности, чем АФП. Как правило, КА включают три основных этапа: 1) предварительно определённые пороговые значения, которые направлены на выявление потенциальных пожаров; 2) контекстуальные тексты, которые определяют пиксели потенциальных пожаров; 3) пороговые значения, отсеивающие ложные сигналы. Самое важное в КА — это охарактеризовать пиксели фона, расположенные по соседству с пикселями потенциальных пожаров. Проверенные пиксели фона очерчивают границы окна, в котором сосредоточены пиксели с потенциальными пожарами. К проверенным пикселям относят такие, которые удовлетворяют следующим условиям: 1) обнаружены при полевых наблюдениях, 2) расположены на земной поверхности, 3) не закрыты облаками, 4) не являются пикселями пожара. Окно начинается с размера 3×3 и растягивается до 21×21 , в котором 25 % пикселей являются проверенными пикселями фона. В случае недостаточного количества выявленных проверенных пикселей фона, то потенциальные пиксели исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Американские учёные разработали КА, состоящий из двух этапов: 1) выявление потенциальных пожаров и 2) подтверждение. Пиксель принимается за пожар, если выполняются следующие условия: (1) $T_3 \geq 316$ К, (2) $\Delta T_{34} \geq \bar{\Delta T}_{34b} + \max(2\sigma_{34b}, 5 \text{ К})$, (3) $T_4 \geq \bar{T}_{4b}$, где $\bar{\Delta T}_{34b}$ и σ_{34b} — среднее и стандартное отклонение ΔT_{34} фоновых пикселей, соответственно. Первое условие выявляет пиксели потенциальных пожаров, а остальные — подтверждают [Justice et al., 1996].

На основе вышеупомянутой работы Флассэ С.П. и Секкато П. [Flasse, Sciccato, 1996] создали всемирный пожарный продукт (Global Fire Product). Пиксель относится к пожарам по совокупности условий: (1) $T_3 > 311$ К, (2) $\Delta T_{34} > 8$ К, (3) $R_2 < 0,2$, (4) $T_3 > \bar{T}_{3b} + 2\sigma_{3b} + 3$ К и (5) $\Delta T_{34} > \bar{\Delta T}_{34b} + 2\sigma_{34b}$, где σ_{3b} — стандартное отклонение T_3 фоновых пикселей [Flasse, Sciccato, 1996].

Гиглио Л. (Giglio L.) с коллегами сравнивали алгоритмы, разработанные Джастис С.О. (Justice C.O.) и Флассэ С.П., и на их основе разработали свою методику. Они относили пиксель к пожарам, если он проходит тесты: (1) $T_3 > 310$ К, (2) $\Delta T_{34} > 6$ К, (3) $R_2 < 0,25$, (4) $\Delta T_{34} \geq \bar{\Delta T}_{34b} + \max(2,5\sigma_{34b}, 4 \text{ К})$, (5) $T_4 > \bar{T}_{4b} + 2\sigma_{3b} - 3$ К. Если снимок AVHRR (NOAA) сделан в ночное время, то должны выполняться несколько иные тесты: (1) $T_3 > 308$ К, (2) $\Delta T_{34} > 4$ К и (3) $\Delta T_{34} \geq \bar{\Delta T}_{34b} + \max(2,5\sigma_{34b}, 4 \text{ К})$ [Giglio et al., 2003].

Основываясь на достижениях исследователей прошлых лет, Кауфман предложил алгоритм выявления активных пожаров для сенсора MODIS-3. Его алгоритм состоит из выявления абсолютных и относительных пожаров. Для идентификации абсолютных пожаров необходимо, чтобы выполнялись два условия: (1) $T_{22} > 360$ К (330 К — в ночное время) и (2) $T_{31} > 330$ К (315 К — в ночное время) и $\Delta T > 25$ К (10 К — ночью), где $\Delta T = T_{22} - T_{31}$; T_{22} и T_{31} — яркостная температура в MODIS-каналах 22 и 31, соответственно. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то пожар считается относительным и идентифицируется по таким тестам: (1) $T_{22} > \bar{T}_{22b} + 3\sigma_{22b}$ и (2) $\Delta T > M_{\Delta T_b} + 3\sigma_{\Delta T_b}$, где \bar{T}_{22b} и σ_{22b} — среднее и стандартное отклонение T_{22} фоновых пикселей, соответственно; $M_{\Delta T_b}$ и $\sigma_{\Delta T_b}$ — медиана и стандартное отклонение ΔT пикселей фона, соответственно. Проверенные фоновые пиксели определяются по следующим условиям: (1) $T_{22} < 325$ К (315 К — ночью) и (2) $\Delta T < 20$ К (10 К — в ночное время). При выполнении критериев (1) $R_1 > 0,3$, (2) $R_2 > 0,3$ и (3) угол блика $< 40^\circ$, где R_1 и R_2 — коэффициенты отражения в MODIS-каналах 1 и 2, соответственно [Kaufman et al., 1998].

Хотя алгоритм выявления активных пожаров сенсором MODIS-3 является довольно точным, существуют две основные проблемы, которые не позволяют в полной мере оценить его точность. Во-первых, часто возникают ложные сигналы, характерные для территорий пустынь и территорий с редкой растительностью. Во-вторых, алгоритм не идентифицирует небольшие пожары. В целях решения данных проблем, Giglio L. усовершенствовал контекстуальный алгоритм выявления пожаров, который предлагает превосходную чувствительность к небольшим пожарам и существенно меньше ложных сигналов. Данный MODIS-алгоритм состоит из девяти этапов.

1. Маскировка облаков и водных объектов. В дневное время пиксель определяется как облака, если выполняется одно условие: (1) $R_1 + R_2 > 0,9$, (2) $T_{32} < 265$ К, (3) $R_1 + R_2 < 0,7$ и $T_{32} < 285$ К, где T_{32} — яркостная температура в MODIS-канале 32. В ночное время облака

- идентифицируются несколько иным образом: (1) $T_{32} < 265$ К. Пиксели воды отсеиваются с помощью MODIS-маски земной поверхности или поверхности моря.
2. Выявление пикселей потенциальных пожаров. В светлое время суток пиксель обозначается как возможный пожар, если $T_{22} > 310$ К, $\Delta T > 10$ К и $R_2 < 0,3$. В тёмное время суток пожар регистрируется при $T_{22} > 305$ К и $\Delta T > 10$ К.
 3. Проверка абсолютными пороговыми значениями. Пожар регистрируется по условию $T_{22} > 360$ К в дневное время и $T_{22} > 320$ К — ночью.
 4. Характеристика фона. Проверенные фоновые пиксели в окне по центру пикселя потенциального пожара считаются таковыми, которые 1) проверены в процессе полевых наблюдений; 2) расположены не на воде; 3) не закрыты облаками и 4) не являются пикселями тёплого фона. Пиксели обозначают тёплый фон при $T_{22} > 325$ К и $\Delta T > 20$ К днём или $T_{22} > 310$ К и $\Delta T > 10$ К — ночью, где $\Delta T = T_{22} - T_{31}$.
 5. Проверка контекстуальными пороговыми значениями. В случае успешного выполнения этапа 4 применяются серии контекстуальных пороговых значений для идентификации относительных пожаров: (1) $\Delta T > \bar{\Delta T}_b + 3,5\delta_{\Delta T_b}$, (2) $\Delta T > \bar{\Delta T}_b + 6$ К, (3) $T_{22} > \bar{T}_{22b} + 3\delta_{22b}$, (4) $T_{31} > \bar{T}_{31b} + \delta_{31b} - 4$ К, (5) $\delta_{22bf} > 5$ К, где $\bar{\Delta T}_b$ и $\delta_{\Delta T_b}$ — среднее и среднее абсолютное отклонение ΔT фоновых пикселей; \bar{T}_{31b} и δ_{31b} — среднее и среднее абсолютное отклонение T_{31} фоновых пикселей; δ_{22bf} — среднее абсолютное отклонение T22 пикселей нагретой поверхности.
 6. Предварительное выявление пожаров. Предварительно пиксели классифицируются как пожар, если выполняется одно из условий (в дневное время): этап 2 — выполнен и тесты 1–3 этапа 5 тоже выполняются (или тесты 4 и 5 этапа 5). В тёмное время суток должно выполняться одно из следующих условий: (1) пиксели прошли этап 2, (2) пиксели прошли тесты 1–3 на 5-м этапе.
 7. Отсевание солнечных бликов. В светлое время суток пиксель классифицируется как солнечный блик и исключается из дальнейшего рассмотрения, если хотя бы одно условие выполняется: (1) $\theta_g < 2^\circ$, (2) $\theta_g < 8^\circ$, $R_1 > 0,1$, $R_2 > 0,2$ и $R_7 > 0,12$, (3) $\theta_g < 12^\circ$ и $N_{aw} + N_w > 0$, где θ_g — угол между векторами, указывающими в направлениях поверхность-спутник и зеркальное отражение (например, $\theta_g = \cos\theta_v \cdot \cos\theta_s - \sin\theta_v \cdot \sin\theta_s \cdot \cos\varphi$); θ_v и θ_s — углы съёмки и зенита солнца, соответственно; φ — угол относительного азимута; R_7 — отражение в MODIS-канале 7; N_w — число пикселей водных объектов в окрестностях потенциального пожара; N_{aw} — число пикселей водных объектов в окрестностях предварительно определённого пожара.
 8. Отсевание пустынь. В светлое время суток пиксель классифицируется как нагретая поверхность без растительности (или с редкой растительностью) если выполняются все критерии: (1) $N_f > 0,1N_v$, (2) $N_f \geq 4$, (3) $R_2 > 0,15$, (4) $\bar{T}_{22bf} < 345$ К, (5) $\delta_{22b} < 3$ К и (6) $T_{22} < \bar{T}_{22bf} + 6\delta_{22bf}$, где N_f — количество пикселей нагретой поверхности в окрестностях потенциального пожара; N_v — количество проверенных фоновых пикселей в окрестностях потенциального пожара; \bar{T}_{22bf} — среднее арифметическое T_{22} пикселей нагретой поверхности.

9. Отсеивание ложных сигналов вблизи водной поверхности. Пиксель отсеивается как не пожарный, если он не удовлетворяет критериям этапа 2 и $N_{uw} > 0$, где N_{uw} — число не замаскированных пикселей воды возле потенциального пожара. Проверенные фоновые пиксели считаются не замаскированными пикселями воды, если выполняются условия: (1) $R_2 < 0,15$, (2) $R_7 < 0,05$, (3) $NDVI < 0$, где $NDVI = (R_2 - R_1)/(R_2 + R_1)$ [Giglio, Csiszar, 2006].

Взяв за основу КА MODIS-4 и алгоритм идентификации дыма, Ваан В. [Wang et al., 2007] разработал несколько иной алгоритм выявления небольших пожаров. Отличия от вышеописанного алгоритма следующие:

- пороговое значение $T_{28} < 255$ К отсеивает облачные края, где T_{28} — яркостная температура в MODIS-канале 28;
- четыре критерия идентификации дыма: (1) $0,15 \leq ((R_8 - R_{19})/(R_8 + R_{19})) \leq 0,5$; (2) $((R_9 - R_7)/(R_9 + R_7)) \geq 0,3$; (3) $((R_8 - R_3)/(R_8 + R_3)) \leq 0,09$ и (4) $R_8 \geq 0,09$, где R_3, R_8, R_9, R_{19} — отражение в MODIS-каналах 3, 8, 9, 19, соответственно. Пиксели потенциального пожара определяются в окне размеров 14×14 по центру пикселя дыма;
- $T_{22} > 293$ К заменяет пороговое значение $T_{22} > 310$ К;
- этапы 7–9 не применяются [Wang et al., 2007].

ВЫВОДЫ

Использование возможностей дистанционного зондирования имеет смысл при решении комплексных задач, связанных с выявлением и контролем динамики пожаров, а также оценкой их энергетических параметров.

Сканер MODIS, наряду с радиометром AVHRR, имеет невысокое пространственное разрешение, однако большой набор спектральных каналов и широкая полоса обзора сделали эти датчики самыми распространёнными источниками получения радиометрических данных.

В общем случае, в алгоритмах обнаружения пожаров используются такие показатели как радиационная температура в каналах 3 и 4 (для радиометра AVHRR), интервалы длин волн для которых равны 3,55...3,93 и 10,3...11,3 мкм, соответственно. Для радиометра MODIS указанным длинам волн соответствуют каналы 21 и 31. Выбор таких диапазонов длин волн для выявления пожаров обусловлен тем, что канал 3 радиометра AVHRR охватывает спектральный максимум излучения, испускаемого объектами с температурой около 800 К, т.е. обычной температурой для горящей растительности, в то время как канал 4 и 5 охватывают спектральный максимум нормальных поверхностных температур около 300 К.

В настоящее время реализован алгоритм автоматического выявления пожаров по снимкам MODIS–MOD14. Однако, пороговые значения, используемые в этом алгоритме, не учитывают региональные особенности местности, что может приводить к существенному занижению вероятности обнаружения пожара на территории азиатской части России. Таким образом, остаётся открытым вопрос выявления пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока. Исходя из данных соображений, необходимо модифици-

ровать пороговые значения, сделав возможным их применение на указанной территории.

По результатам работы наметился следующий план применения на практике достижений зарубежных учёных:

- провести более подробный обзор литературы по изучаемой теме;
- дать физико-географическую характеристику территории исследования; в тематике диссертации имеет смысл взять азиатскую территорию России, поскольку, несмотря на все достижения науки, леса Сибири и Дальнего Востока по-прежнему подвергаются частым и серьёзным пожарам;
- подобрать конкретную методику выявления пожаров, применявшуюся для бореальных лесов; так, уже проводилось исследование для лесов Канады;
- на основе результатов предыдущих этапов исследования модифицировать пороговые значения алгоритма выявления пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

- [Глаголев, 2015] *Глаголев В. А.* Оценка и прогноз возникновения пожаров растительности на примере Еврейской автономной области: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / В. А. Глаголев. Биробиджан, 2015. 147 с.
- [Akhouzadeh et al., 2006] *Akhouzadeh M., Saradjian M. R., Rajabi M. A.* Diagnosis and modeling of forest fire spread using MODIS satellite images // Proc. 1st Intern. Conference on Opposition with Natural Disaster. Iran. 2006. P. 8.
- [Arino, Melinotte, 1988] *Arino O., Melinotte J. M.* The 1993 Africa Fire Map // Intern. J. Remote Sensing. 1998. V. 19. P. 2019–2023.
- [Bipasha, Pal, 2009] *Bipasha P. S., Pal P. K.* Automatic smoke detection using satellite imagery: preparatory to smoke detection from Insat-3D // Intern. J. Remote Sensing. 2009. V. 30. No. 1. P. 9.
- [Chrysoulakis, Cartalis, 2003] *Chrysoulakis N., Cartalis C.* A new algorithm for the detection of plumes caused by industrial accidents, on the basis of NOAA/AVHRR imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. P. 3353–3367.
- [Chung, 2002] *Chung Y. S.* Satellite observations of smoke plumes from forest fires in Canada // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. P. 2341–2343.
- [Flannigan, Vonder Haar, 1986] *Flannigan M. D., Vonder Haar T. H.* Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR // Canadian J. Forest Research. 1986. V. 16. P. 975–982.
- [Flasse, Ceccato, 1996] *Flasse S. P., Ceccato P.* A contextual algorithm for AVHRR fire detection // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. P. 419–424.
- [Franca et al., 1995] *Franca J. R. A., Brustet J. M., Fontan J.* Multispectral remote sensing of biomass burning in West Africa // J. Atmospheric Chemistry. 1995. V. 22. P. 81–110.
- [Giglio, Csiszar, 2006] *Giglio L., Csiszar I.* Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. 12 p. doi: 10.1029/2005JG000142.
- [Giglio et al., 1999] *Giglio L., Kendall J. D., Justice C. O.* Evaluation of global fire detection algorithm using simulate AVHRR infrared data // Intern. J. Remote Sensing. 1999. V. 20. P. 1947–1985.
- [Giglio et al., 2003] *Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 87. P. 273–282.

- [Huajin, Zhao-Liang, 2014] *Huajin T., Zhao-Liang L.* Quantitative remote sensing in thermal infrared: Theory and applications. Springer Remote Sensing, 2014. 281 p. doi: 10.1007/978-3-642-42027-6.
- [Huang, Siegert, 2004] *Huang S., Siegert F.* ENVISAT multisensor data for fire monitoring and impact assessment // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. Iss. 20. P. 4411–4416.
- [Justice et al., 1996] *Justice C. O., Kendall J. D., Dowty P. R., Scholes R. J.* Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA advanced very high resolution radiometer data // J. Geophysical Research. 1996. V. 101. P. 23 851–23 863.
- [Kaufman et al., 1990] *Kaufman Y. J., Tucker C. J., Fung I.* Remote sensing of biomass burning in the tropics // J. Geophysical Research. 1990. V. 95. P. 9927–9939.
- [Kaufman et al., 1998] *Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., Kendall J. D., Prins E. M., Giglio L., Ward D. E., Menzel W. P., Setzer A. W.* Potential global fire monitoring from EOS-MODIS // J. Geophysical Research. 1998. V. 103(D24). P. 32 215–32 238.
- [Kennedy et al., 1994] *Kennedy P. J., Belward A. S., Grégoire J.-M.* An improved approach to fire monitoring in West Africa using AVHRR data // Intern. J. Remote Sensing. 1994. V. 15. P. 2235–2255.
- [Li et al., 1997] *Li Z., Cihlar J., Moreau L., Huang F., Lee B.* Monitoring fire activities in the boreal ecosystem // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 29 611–29 624.
- [Li et al., 2000a] *Li Z., Nadon S., Cihlar J.* Satellite-based detection of Canadian boreal forest fires: Development and application of the algorithm // Intern. J. Remote Sensing. 2000. V. 21. P. 3057–3069.
- [Li et al., 2000b] *Li Z., Nadon S., Cihlar J., Stocks B.* Satellite-based mapping of Canadian boreal forest fires: Evaluation and comparison of algorithms // Intern. J. Remote Sensing. 2000. V. 21. P. 3071–3082.
- [Maeda et al., 2011] *Maeda E. E., Arcoverde G. F. B., Pellikka P. K. E., Shimabukuro Y. E.* Fire risk assessment in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and change vector analysis // Applied Geography. 2011. V. 31. P. 76–84.
- [Poorshakori Allahdeh et al., 2011] *Poorshakori Allahdeh F., Darvishsefat A. A., Samadzadegan F., Selyari J.* Investigation of active fire detection using MODIS images (case study: Golestan National Park) // Proc. 1st Intern. Conf. Fire in Natural Resources. Iran. 2011. P. 11.
- [Saeedeh et al., 2015] *Saeedeh E., Jafar Oladi G., Hamid J., Mohammad Reza S.* Evaluation of the MODIS fire-detection product in Neka-Zalemroud fire-prone forests in Northern Iran // Polish Journal of Environmental Studies. 2015. V. 24. No. 5. P. 2305–2308.
- [Sarkargar Ardakani, Valedanzodj, 2011] *Sarkargar Ardakani A., Valedanzodj M. J.* Spatial and temporal analysis of fires detected by MODIS data in Northern Iran from 2001 to 2008 // Selected Topics in J. Applied Earth Observations and Remote Sensing. IEEE 4(1). 2011. P. 216–225.
- [Wang et al., 2007] *Wang W., Qu J. J., Hao X., Liu Y., Sommers W. T.* An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: A preliminary study in the southeastern United States // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 108. P. 163–170.

A REVIEW OF EXISTING IDENTIFICATION FIRE ALGORITHMS USING SATELLITE IMAGES

N. N. Bardakov¹, V. V. Rastoskuev²

¹ Russian State Hydrometeorological University (RSHU)

² Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University (IES SPbSU)

Fires are one of the main dangerous natural processes, which influence on economic-ecological state of big areas. For example, forest fires are 12...36 thousands in Russia every year. In accordance with data of Federal forestry agency the mean size of fire damage is 1350 million per year. Therefore, methods of fire identification with using satellite images have become very popular.

The objective of this research is a review of existing identification fire algorithms using satellite images.

There are two kinds of fire identification algorithms exist. Ones are the algorithms of fixed thresholds (AFT) and ones are contextual algorithms (CA). The first one uses empirical defined threshold values for identification of fire pixels. The most of AFT includes 3 main stages: 1) usage of mean IR-channels for identification of all potential fires; 2) usage of thermal IR for excluding of cloud pixels; 3) calculation of brightness temperature difference between the mean IR and thermal IR for excluding warm background pixels. CA uses dynamical techniques based on differences between pixels of potential fires and background. CA usually includes 3 main stages: 1) predefined threshold values for identification of potential fires; 2) contextual tests, which define potential fire pixels; 3) threshold values for excluding false signals.

Conclusions. Using of remote sensing possibilities have sense for deciding of complex challenges with identification and control of fire dynamic. Algorithm of automatically fire identification now is resolved with MODIS–MOD14. However thresholds of it don't consider regional features of study area. It can lead to declination of fire identification possibility for Asian part of Russia. Therefore, the challenge of fire identification is stayed open for Siberia and Far East.

Keywords: identification, algorithm, brightness temperature, satellite images, fires, reflectance.

Bardakov Nikolay Nikolaevich — postgraduate student, murmakil@mail.ru

Rastoskuev Viktor Vasil'evich — professor, doctor of technical sciences

ИЗУЧЕНИЕ МАРСИАНСКОГО АЭРОЗОЛЯ ПО ДАННЫМ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА SPICAM IR НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ «МАРС-ЭКСПРЕСС»

Д. С. Бецис¹, А. А. Фёдорова¹, Ф. Монтмессан², О. И. Кораблёв¹, Ж.-Л. Берто²

¹ Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

² Лаборатория атмосферы, среды, космических наблюдений (Париж, Франция) / Медицинский центр Университета Питтсбурга (США) / Национальный центр научных исследований (НЦНИ) Франции

Работа посвящена изучению пространственных, сезонных и межгодовых вариаций марсианского аэрозоля. Наблюдение солнечных затмений спектрометром SPICAM IR на борту аппарата «Марс-Экспресс» позволяет получать информацию о свойствах взвешенных частиц на высотах от 0 до 80 км. С начала работы прибора (2004) накоплен значительный наблюдательный материал — шесть марсианских лет (27–32 МУ). По восстановленным профилям экстинкции можно, решая обратную задачу рассеяния по теории Ми, найти средний размер и концентрацию частиц.

Наблюдения, которые будут осуществляться комплексом спектрометров ACS на борту орбитального зонда TGO в рамках миссии ExoMars-2016, являются продолжением изучения климатологии Марса, поэтому методы обработки данных, применяемые для ИК-канала SPICAM (SPICAM IR), будут использоваться и для приборов TGO.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-52-16011).

Ключевые слова: Марс, атмосфера, аэрозоль, «Марс-Экспресс».

ПЫЛЕВОЙ ЦИКЛ МАРСА

Пылевой цикл имеет период, равный одному марсианскому году (МУ) с небольшими вариациями и обусловлен сменой сезонов. Наклон оси вращения Марса к плоскости орбиты мало отличается от земного ($25^{\circ} 11' 24''$), поэтому на нём также существуют времена года. Для их отсчёта используется понятие солнечной долготы (L_s), которая определяется как угол, отсчитываемый от воображаемой линии Марс-Солнце во время весеннего равноденствия в северном полушарии и меняется от 0 до 360° . Но эксцентриситет орбиты Марса существенно больше, чем у Земли, и этот факт также оказывает влияние на годовой цикл климата.

В первой половине года ($L_s = 0 \dots 180^{\circ}$) планета проходит апогеий — самое большое расстояние от Солнца. Этот сезон характеризуется малым количеством пыли (северная весна и большая часть лета), на низких и средних широтах оптическая толщина пыли в столбе в инфракрасном (ИК) диапазоне не превышает 0,1 (в видимом диапазоне это соответствует значению 0,3).

Бецис Дарья Станиславовна — аспирантка, dasha-integral@yandex.ru

Фёдорова Анна Александровна — заведующая лабораторией, кандидат физико-математических наук, fedorova@iki.rssi.ru

Монтмессан Франк — научный сотрудник, доктор философии, franck.montmessin@latmos.ipsl.fr

Кораблёв Олег Игоревич — заместитель директора, руководитель отдела, доктор физико-математических наук, korab@iki.rssi.ru

Берто Жан-Луи — заслуженный руководитель исследований, доктор философии (PhD), jean-loup.bertraux@latmos.ipsl.fr

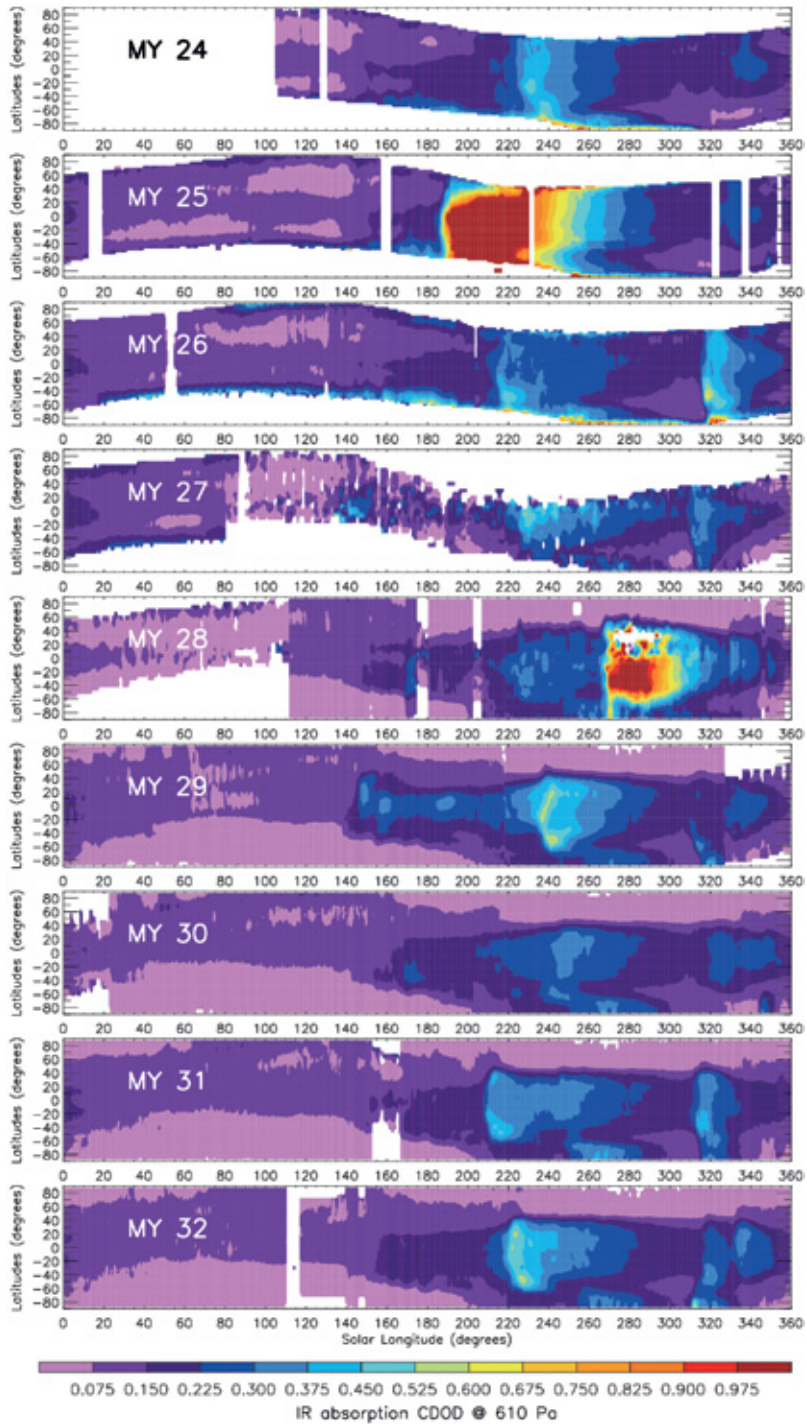


Рис. 1. Средние зональные значения интегральной оптической толщины пыли в столбе в полосе 9,3 мкм, нанесённые на сетку Ls-широта. Значения нормированы к эталонному уровню давления 610 Па для различных марсианских лет [Montabone et al., 2015]

Аэрозоль присутствует над краями сезонных шапок CO_2 как на северном, так и на южном полюсе. Это подтвердили изображения аппаратов «Викинг-1» и «Викинг-2», MGS (Mars Global Surveyor), MRO (Mars Reconnaissance Orbiter), и «Марс-Экспресс». Крупных пылевых бурь в данный сезон не фиксировалось.

«Пыльный сезон» ($L_s = 180 \dots 360^\circ$) начинается северной осенью и охватывает то время, когда Марс проходит перигелий. Поток солнечного излучения увеличивается почти на 40 %, что приводит к интенсивному таянию южной полярной шапки, сильным градиентам давления и, как следствие, ветрам и поднятию пыли. Именно в это время наблюдаются, помимо местных, региональные и глобальные пылевые бури, пространственный масштаб, расположение и продолжительность которых может значительно варьироваться в разные годы. Такие явления также подтверждаются многолетними наблюдениями приборов с орбиты Марса (рис. 1).

НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

Метод солнечных затмений, или солнечное просвечивание — один из наиболее эффективных способов исследования атмосферы. Он применялся на Земле, Венере, Марсе. Основное преимущество перед наблюдениями в надир заключается в том, что метод солнечного (и звёздного) просвечивания позволяет строить вертикальный профиль распределения атмосферных газов и аэрозолей, изучать структуру и динамику различных слоёв. В случае Марса одним из первых подобных экспериментов были наблюдения с орбиты спектрометром «Огюст» на борту орбитального аппарата «Фобос-2» в 1989 г. Аналогичные измерения проводили приборы TES (Thermal Emission Spectrometer) на аппарате MGS, Mars Climate Sounder (MCS) на MRO. Спектрометр SPICAM на аппарате «Марс-Экспресс», запущенном в 2003 г., поддерживает несколько режимов: солнечное просвечивание, лимб, надир.

Калибровка выполняется автоматически перед каждым измерением затмения или сразу после, по наблюдению Солнца над атмосферой. Некоторое количество спектров (10–20) регистрируются с расстоянием от линии визирования до лимба планеты порядка 200 км (на такой высоте вклад атмосферы отсутствует), которые усредняются для получения эталонного спектра. По мере погружения линии визирования в атмосферу полосы атмосферных газов изменяют свою глубину, что даёт информацию о поглощении и рассеянии [Korablev et al., 2006]. Спектры поглощения лучей, проходящих последовательно через высотные слои, вычисляются как частное измеряемых спектров и эталонного с учётом коррекции на темновой сигнал и температурного дрейфа в приборе.

Спектрометр SPICAM IR работает в спектральном диапазоне от 1 до 1,7 мкм, имеет два детектора, принимающих сигналы в двух различных поляризациях. В основе ИК-канала лежит акустооптический перестраиваемый фильтр (acoustooptic tunable filters — AOTF), 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 $3,5 \text{ см}^{-1}$. Время одного измерения (одна спектральная точка) может быть установлено 1,4; 2,8;

5,6 и 11,2 мс. При наблюдении солнечных затмений оптимальным является 5,6 мс.

Имея сигнал (спектр), записанный на каждой высоте, и информацию о геометрии и точном времени наблюдения, восстанавливается профиль оптической толщины, затем методом «очистки луковицы» — коэффициента экстинкции (поглощения) для 10 длин волн: 996,4; 1093,7; 1158,2; 1197,0; 1241,4; 1272,9; 1304,4; 1321,9; 1514,6; 1552,2 нм, выбранных таким образом, чтобы на них не попадало линий поглощения атмосферных газов [Fedorova et al., 2009]. В таком случае можно считать, что ослабление потока солнечного излучения обусловлено исключительно аэрозолем разной природы. Предполагая, что ослабление происходит на сферических частицах пыли (вариант «пыль») или водяного льда (вариант «лёд») и используя теорию Ми, мы решаем обратную задачу и подбираем такое распределение по размерам частиц, чтобы интеграл

$$k_{ext}(\lambda, z) = \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(\lambda, r) \cdot n(r, z) dr, \quad (1)$$

где λ — длина волны; z — высота; k_{ext} — коэффициент экстинкции; σ_{ext} — индивидуальный коэффициент экстинкции на частице с определённым радиусом; n — распределение по размерам (концентрация) на определённой высоте.

Хорошо соответствующее действительности выражение для концентрации частиц в зависимости от радиуса (в исследуемом диапазоне размеров частиц 0,4...1,5 мкм) — это логнормальное:

$$n(r) = \text{const} \cdot r^{-1} \exp\left\{-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g}\right\}, \quad (2)$$

где r_g и σ_g — параметры, связанные с эффективным радиусом и вариацией распределения:

$$r_{eff} = r_g \exp\left\{\frac{5}{2} \ln^2 \sigma_g\right\}, \quad v_{eff} = \exp\left\{\ln^2 \sigma_g\right\} - 1. \quad (3)$$

Для оптимального решения задачи расчёт проводился с пятью различными параметрами σ_g , равными 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5. Далее из результатов выбирался тот, при котором достигался минимум функции χ^2 . Минимизация проводилась с использованием алгоритма Левенберга–Марквардта, ошибка найденного таким образом параметра r_g оценивалась как квадратный корень из ковариационной матрицы.

Результаты сравнивались с данными, рассчитанными в климатической модели Марса (Mars Climate Database), разработанной в Лаборатории динамической метеорологии (Dynamic Meteorology Laboratory — LMD) во Франции (<http://www-mars.lmd.jussieu.fr/index.html>).

ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измеряемый SPICAM IR диапазон значений экстинкции составляет от 0,0001 до 0,015 км⁻¹ (определяется возможностью выделить сигнал на фоне шума). Для анализа сезонных, широтных и высотных вариаций была построена карта, представленная на рис. 2, в которой год разбит на 12 месяцев по 30° Ls.

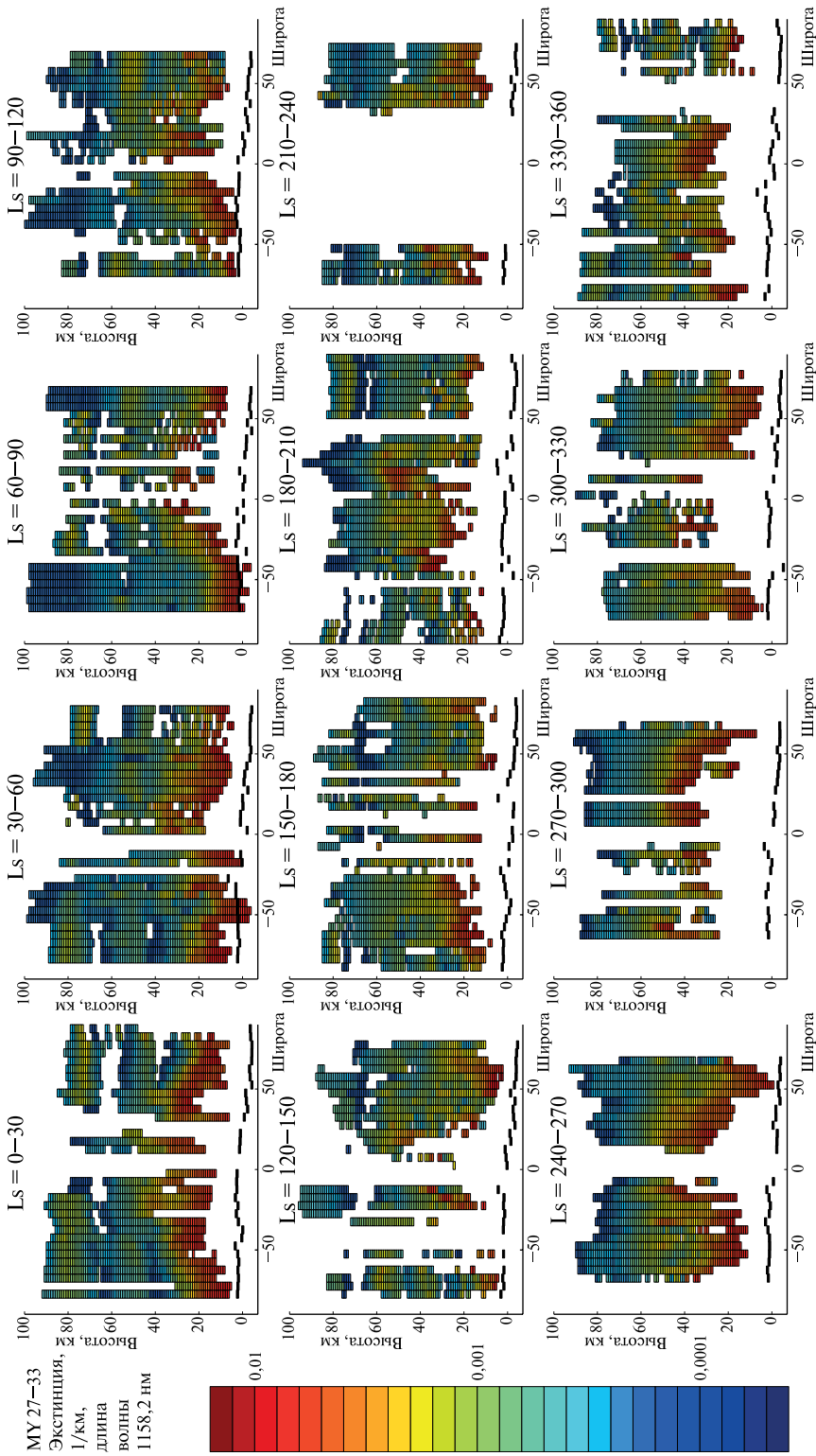


Рис. 2. Карта зависимости экстинкции от широты, высоты и сезона. Чёрным цветом показана топография поверхности

По ней можно видеть увеличение экстинкции ближе к экватору и уменьшение к полюсам на каждой отдельно взятой высоте, при этом максимум достигается вблизи подсолнечной точки. Изменения с сезоном явно подтверждают увеличение значений в «пыльный сезон» — во второй половине года высоты, на которых наблюдаются значительные значения экстинкции (до $0,01 \text{ км}^{-1}$), достигают 50 км, тогда как в первой половине года редко оказываются выше 30 км.

Изменения экстинкции с высотой не всегда монотонны. Например, наличие облаков сопровождается заметным увеличением экстинкции на определённых высотах (рис. 3а). Так как спектральная зависимость в измеряемом прибором SPICAM IR диапазоне длин волн гладкая и не имеет характерных особенностей для вариантов и «пыль», и «лёд», то чёткого критерия, чтобы различать природу частиц, нет. Однако по описанному увеличению значений на профилях экстинкции в ряде случаев можно почти уверенно говорить о присутствии облаков. Просмотр и выделение таких орбит показал, что наиболее ярко они проявляются в начале — первой половине года в северном полушарии (тропический облачный пояс афелия), иногда во второй половине года в южном полушарии и периодически в других местах (оптически тонкие облака, которые в надир не наблюдаются). С учётом этого анализа были восстановлены профили радиусов частиц, значения в которых на указанных высотах соответствовали водяному льду, а на остальных — минеральной пыли (пример на рис. 3б).

В целом, эффективный радиус распределения, который позволяют определить возможности прибора и метода, варьировался в диапазоне от 0,2 до 1,2 мкм. Были выявлены зависимости радиуса от параметров:

- высоты (в среднем параметр r_{eff} уменьшается с высотой, но бывают немонотонные профили, особенно в сезон пылевых бурь);
- сезона (в сезон пылевых бурь частицы крупнее и сильнее разброс, чем в спокойную первую половину года);

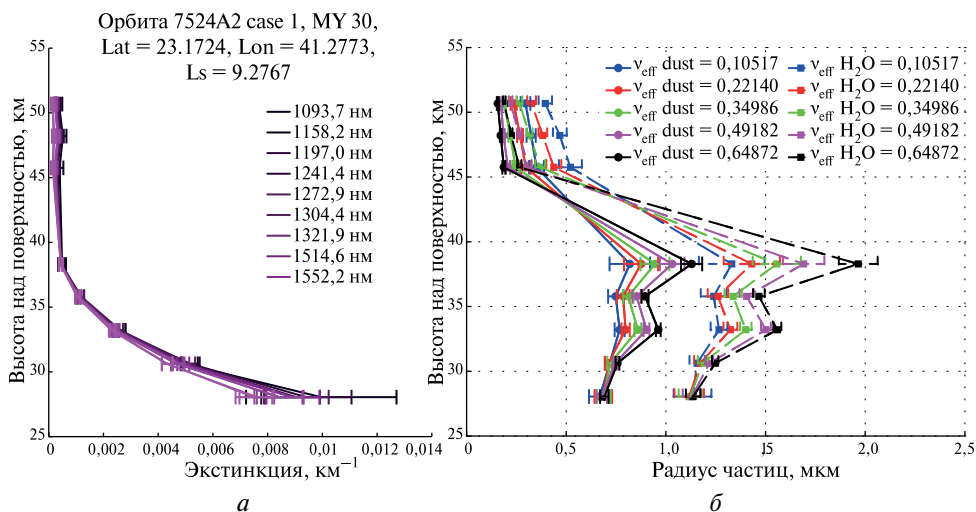


Рис. 3. Пример профиля экстинкции с облаком водяного льда и восстановленные радиусы частиц минеральной пыли и льда

- широты (у полюсов, как правило, более мелкие — 0,4...0,7 мкм, ближе к экватору могут быть крупнее);
- природы частиц (минеральная пыль мельче, чем водяной лёд — в конденсационных ледяных облаках размер частиц составлял 0,9...1,5 мкм и крупнее).

На определённых высотах решение обратной задачи выдавало значения больше 1,5 мкм, но, анализируя кривые фитирования в таких точках, нельзя с уверенностью сказать, что физическим результатом являются именно эти значения, так как спектральный диапазон прибора недостаточно широк для исследования таких крупных частиц. Можно лишь сказать, что они действительно есть. Замечено, что такие ситуации наиболее часто возникают на нижней границе облака (как можно видеть на рис. 3), этот факт можно объяснить тем, что быстрее всего оседают большие тяжёлые частицы.

ЛИТЕРАТУРА

- [Fedorova et al., 2009] *Fedorova A., Korablev O., Bertaux J.-L., Rodin A., Montmessin F., Belyaev D., Reberac A.* Solar infrared occultations by the SPICAM experiment on Mars Express: Simultaneous observations of H₂O, CO₂ and aerosol vertical distribution // *Icarus*. 2009. V. 200(1). P. 96–117.
- [Korablev et al., 2006] *Korablev O.* et al. SPICAM IR acousto-optic spectrometer experiment on Mars Express // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. Iss. E9.
- [Montabone et al., 2015] *Montabone L., Forget F., Millour E., Wilson R. J., Lewis S. R., Cantor B., Kass D., Kleinböhl A., Lemmon M. T., Smith M. D., Wolff M. J.* Eight-year Climatology of Dust Optical Depth on Mars // *Icarus*. 2015. V. 251. P. 65–95.

STUDY OF AEROSOL PARTICLES ON MARS FROM THE SOLAR OCCULTATION OBSERVATIONS BY SPICAM INFRARED EXPERIMENT ON MARS-EXPRESS

D. S. Betsis¹, A. A. Fedorova¹, F. Montmessin², O. I. Korablev¹, J.-L. Bertaux²

¹ Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI RAN)

² Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS, Paris, France) / University of Pittsburgh Medical Center (UPMC, USA) / Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, France) LATMOS-UVSQ/UPMC/CNRS

This paper is devoted to research of the spatial, seasonal and interannual variations in Martian aerosol. The observation of solar occultations by spectrometer SPICAM IR onboard Mars Express spacecraft provides us information about the properties of suspended aerosol particles in the altitude range from 0 to 80 km. Since the beginning of operations (2004) we have obtained observational material for 6 Martian years (27–32 MY). We can retrieve profiles of vertical extinction at 10 wavelengths, and then using Mie scattering theory with adopted refraction indices of dust and H₂O ice we retrieve particle size and number density.

The observations by ACS (Atmospheric Chemistry Suite), the instrument onboard TGO mission, the part of ExoMars-2016, will be also conducted in solar occultation technique so the data processing methods used for IR channel of SPICAM will be used for TGO devices too.

Keyword: Mars, atmosphere, aerosol, Mars-Express.

Betsis Daria Stanislavovna — postgraduate student, dasha-integral@yandex.ru

Fedorova Anna Aleksandrovna — head of laboratory, PhD, fedorova@iki.rssi.ru

Montmessin Franck — research associate, PhD, franck.montmessin@latmos.ipsl.fr

Korablev Oleg Igorevich — deputy director, head of department, doctor of physical and mathematical sciences, korab@iki.rssi.ru

Bertaux Jean-Loup — directeur de recherche emeritus, PhD, jean-loup.bertaux@latmos.ipsl.fr

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. М. Богачёв¹, В. П. Крылов²

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)

Рассмотрены инженерные аспекты подготовки и результаты экспериментальной апробации подхода к параметризации вольт-амперных характеристик, основанного на аппроксимации локальных участков вольт-амперных характеристик (ВАХ) полиномами Чебышева. В качестве параметров ВАХ при этом используются информативные коэффициенты разложения Чебышева, полученные с помощью известного метода минимизации величины экспериментального риска, позволяющего определить оптимальную степень аппроксимирующего полинома с учётом точности измерений. При этом одним из необходимых критериев информативности является статистическая разрешающая способность контроля. Описано разработанное программное обеспечение измерительно-вычислительного комплекса, включающего аппаратные средства с компьютерным управлением через USB-интерфейс (Universal Serial Bus): блок питания АКПП-1119 фирмы ПРИСТ, мультиметр 34450А фирмы Agilent, климатическую камеру S-1.2В-3200 фирмы Thermotron Industries.

В статье использованы материалы, полученные при финансовой поддержке Минобрнауки России по Соглашению № 14.574.21.0132 о предоставлении субсидии на выполнение проекта RFMEFI57414X0132.

Ключевые слова: измерительно-вычислительный комплекс, вольт-амперная характеристика, аппроксимация, полиномы Чебышева, метод минимизации экспериментального риска, статистическая разрешающая способность, контроль электронной компонентной базы.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полупроводниковой электронной компонентной базы (ЭКБ) давно и успешно используются для входного контроля и индивидуального прогнозирования надёжности при комплектовании электронных средств космических аппаратов (ЭС КА) с длительными сроками активного существования на орбите.

Контроль ВАХ может быть непараметрическим и сводиться при этом к визуальному контролю формы ВАХ и её первой и второй производных путём создания шаблонов годных и негодных. Контроль формы ВАХ позволяет быстро отсеять компоненты с серьёзными дефектами, такими как паразитный р-п-переход, дефект контактов. Контроль по первой и второй производным позволяет обнаружить более мелкие дефекты р-п-перехода, например, наличие локальных участков с повышенным сопротивлением [Чернышев, 1998].

Непараметрический контроль ВАХ не позволяет при индивидуальной оценке надёжности исследуемого полупроводникового прибора использовать методы распознавания образов. Для эффективного использования этих методов необходима параметризация ВАХ, т.е. переход к ограниченному набору информативных параметров. Сегодня одним из самых распространённых и применяемых является контроль по m -параметрам.

Богачёв Алексей Михайлович — студент, bogachev-al2012@yandex.ru

Крылов Владимир Павлович — доктор технических наук, v_p_krylov@vlsu.ru

Вольт-амперная характеристика идеального p - n -перехода определяется следующей экспоненциальной зависимостью:

$$I_{np} = I_0 \left(\exp \frac{U_{pn}}{\Phi_T} - 1 \right), \quad (1)$$

где I_0 — ток насыщения перехода; Φ_T — контактная разность потенциалов; U_{pn} — напряжение, приложенное к p - n -переходу. Если построить такую ВАХ в полулогарифмических координатах, то получится прямая линия с коэффициентом наклона, равным 1. Однако реальные характеристики p - n -переходов состоят из нескольких участков с разными коэффициентами наклона. В общем случае характеристику можно описать следующим выражением:

$$I_{np} \approx I_0 \exp \frac{U_{pn}}{m\Phi_T}, \quad (2)$$

где m — коэффициент наклона ВАХ в полулогарифмическом масштабе, или, как принято его называть, m -характеристика.

По степени отличия значения коэффициента m от теоретического для разных диапазонов токов можно судить о качестве полупроводникового прибора. По отклонению m -характеристики партии приборов от идеальной можно оценить стабильность технологического процесса и на основе полученных данных судит о возможных дефектах в полупроводниковых структурах [Чернышев, 1998].

Участки ВАХ можно аппроксимировать обычным алгебраическим полиномом вида

$$y_n(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad (3)$$

где n — степень полинома; a_i — коэффициент разложения. Данный метод аппроксимации использован для прогнозирования радиационной стойкости КМОП ИС [Коршунов и др., 2009], однако он связан со значительными вычислительными трудностями при поиске коэффициентов разложения при значениях $n \geq 3$. Дополнительные проблемы возникают при учёте погрешностей измерений ВАХ.

В связи с указанными трудностями предлагается использовать аппроксимацию алгебраическим полиномом степени n , заданного коэффициентами его разложения по полиномам Чебышева, вида

$$P_n(x) = \sum_{j=0}^n C_j Q_j(x),$$

где n — степень полинома; C_j — коэффициенты разложения, которые будут использоваться в качестве параметров ВАХ; Q_j — полином Чебышева степени j , значения которого вычисляются по рекуррентной формуле:

$$Q_j(x) = 2xQ_{j-1}(x) - Q_{j-2}(x), \quad Q_0(x) = 1, \quad Q_1(x) = x. \quad (4)$$

Для учёта измерительных погрешностей аппроксимация производится методом структурной минимизации эмпирического риска, разработанным в вычислительном центре РАН. Величина эмпирического риска оценивается по формуле:

$$I(\overline{C_j}) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \frac{(y_i - P_n(x))^2}{\sigma_i^2}, \quad (6)$$

где l — количество точек ВАХ; σ_i — приведённая погрешность измерений точки ВАХ; x_i, y_i — результаты измерений напряжения и тока соответственно [Вапник, 1984].

Необходимым условием параметризации является возможность различать параметры на фоне интегральной случайной погрешности определения признака распознавания. Во ВлГУ для этих целей разработан метод определения статистической разрешающей способности параметров ВАХ. Метод основан на определении отношения среднеквадратичных отклонений технологической и измерительной погрешностей.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_u} = \sqrt{\frac{r}{1-r}}, \quad (7)$$

где σ_m и σ_u — среднеквадратическое отклонение технологической и измерительной погрешностей соответственно; r — коэффициент парной линейной корреляции результатов основных и повторных измерений

$$r = \frac{\text{cov}(x_o; x_n)}{\sigma(x_o) \cdot \sigma(x_n)}, \quad (8)$$

где x_o и x_n — результаты основного и повторного контроля соответственно, $\text{cov}(x_o, x_n)$ — ковариация случайных величин отклонений x_o и x_n [Крылов, 2003].

Автоматизированные измерения ВАХ выполнены с помощью измерительно-вычислительного комплекса, состоящего из следующих приборов: мультиметр Agilent 34450А (рис. 1), блок питания АКПП-1119 фирмы ПРИСТ (рис. 2), камера тепла и холода S-1.2В-3200 фирмы Thermotron Industries (рис. 3). Для работы с комплексом разработана программа управления комплексом с выходом в любой удобный пользователю математический пакет для обработки экспериментальных данных (рис. 4).

Программа читает настройки из текстового файла (левый нижний рисунок), результаты измерений выводятся также в текстовый файл, при этом для каждого измерения в отдельной строке через точку с запятой сначала записывается напряжение в вольтах, а потом ток в амперах. Такой формат вывода данных удобен для обработки, например, математическим пакетом MathCad. Программа автоматически завершает измерения при достижении максимального тока или напряжения, которые задаются в файле настроек, также можно задать значение шага напряжения.

Была проведена апробация описанного выше подхода на небольшой партии стабилитронов КД814, прямые ветви ВАХ стабилитронов приведены на рис. 5. Эксперимент показал, что для шестого признака отношение технологической погрешности к измерительной погрешности — более шести, таким образом, этот коэффициент является наиболее информативным, т.е. мы можем уверенно различать приборы по данному коэффициенту с учётом рекомендаций нормативных документов по контролю точности технологических процессов. Результаты эксперимента приведены ниже.



Рис. 1. Мультиметр Agilent 34450A



Рис. 2. Источник питания АКИП-1119



Рис. 3. Камера тепла и холода S-1.2B-3200 фирмы Thermotron Industries

```

C:\Documents and Settings\labogachev\Рабоч...
Connected
Measurements are started
To stop, click ESC
Voltage=1.98308 U; Current=0.0855235 A
Measurements are finished
    
```

```

settings --- Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка
NamePS=COM4
BaudRate=9600
ByteSize=8
Address=0
MaxCurrent=100
step=100
maxVoltage=7500
MySource=USB0::0x0957::0x8318::my54210087::0::INSTR
Options=QueryInstrStatus=false
    
```

```

result --- Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка
0.0983083; 2.27083e-008;
0.198641; 3.01183e-008;
0.297754; 3.68055e-008;
0.398106; 8.80491e-008;
0.498456; 1.18387e-006;
0.598805; 1.78438e-005;
0.697918; 6.80448e-005;
0.798236; 0.000134739;
0.898606; 0.000208105;
0.998951; 0.00028555;
1.0981; 0.000366789;
1.19844; 0.00046342;
1.29881; 0.000619233;
1.39905; 0.000938261;
1.49764; 0.00523119;
1.59702; 0.0108504;
1.69608; 0.0180575;
1.7951; 0.0252882;
1.89332; 0.0300787;
1.99303; 0.0339937;
2.09275; 0.0376314;
2.19248; 0.0411416;
2.291; 0.0445352;
2.39085; 0.0479132;
2.49061; 0.0512488;
2.59039; 0.0545481;
2.68895; 0.057771;
    
```

Рис. 4. Программа управления комплексом (слева сверху); файл, содержащий настройки программы (слева внизу); файл с выходными данными (справа)

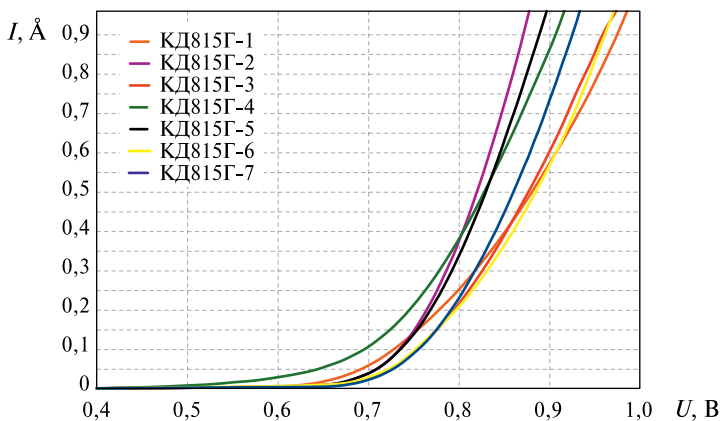


Рис. 5. Прямые ветви ВАХ стабилитронов

Результаты эксперимента

№ признака	0	1	2	3	4	5	6	7
σ_m / σ_u	2,29	2,78	2,46	2,03	2,49	5,37	6,59	1,39

Данный подход принципиально может быть распространён на различные варианты двухполюсного подключения многовыводной полупроводниковой ЭКБ на постоянном или переменном токе.

ЛИТЕРАТУРА

[Чернышев, 1998] *Чернышев А. А.* Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: Радио и связь, 1998. 256 с.
 [Коршунов и др., 2009] *Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Белоус А. И., Шведов С. В., Ластовский С. Б., Карась В. И., Кульгачев В. И.* Прогнозирование радиационной стойкости КМОП интегральных микросхем // 19-я Международ. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 14–18 сент. 2009, Севастополь, Крым, Украина. 2009. Р. 721–723.
 [Вапник, 1984] *Вапник В. Н.* Алгоритмы и программы восстановления зависимостей. М.: Наука, Гл. ред. физико-мат. лит., 1984. 816 с.
 [Крылов, 2003] *Крылов В. П.* Автоматизированный контроль аналоговых интегральных микросхем: Лабораторный практикум. Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2003. 68 с.

PARAMETRIZATION OF VOLT AMPERE CHARACTERISTICS SEMICONDUCTOR ELECTRONIC COMPONENT BASIS OF ELECTRONIC MEANS OF SPACECRAFTS

A. M. Bogachyov¹, V. P. Krylov²

Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU)

Engineering aspects of preparation and results of the experimental approbation of the approach to parametrization of volt-ampere characteristics based on approximations of local sections of the characteristic are considered by Chebyshev polynomials. As its parameters at the same time the informative coefficients of expansion of Chebyshev received by means of the known method of minimization of value of the experimental risk allowing to define an optimum level of an approximating polynomial taking into account the accuracy of measurements are used. At the same time one of necessary criteria of informtiveness is statistical resolution capability of monitoring. The developed software of the measuring computer system, which is turning on hardware with computer control via the USB interface, is described: power supply unit of AKIP-1119 of PRIST firm, multimeter 34450A of Agilent firm, climatic camera S-1.2B-3200 of Thermotron Industries firm.

Keywords: measuring computer system, volt ampere characteristic, approximation, Chebyshev polynomials, method of minimization of the experimental risk, statistical resolution capability, monitoring of electronic component basis.

Bogachev Alexey Mihailovich — student, bogachev-al2012@yandex.ru
Krylov Vladimir Pavlovich — doctor of technical sciences, v_p_krylov@vlsu.ru

ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРА ГАЗА, АККРЕЦИРУЕМОГО НА ПОВЕРХНОСТЬ МОЛОДЫХ ЗВЁЗД

А. В. Додин

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ)

Работа посвящена самосогласованному моделированию спектра излучения приповерхностной аккреционной структуры звезд типа Т Тельца с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия. Для решения поставленной задачи предлагается обобщение метода выборочной непрозрачности на случай наличия скачка скорости. Суть модификации заключается в том, что для каждой частотной точки предлагается выбирать сетку по углам таким образом, что доплеровские смещения по частоте на этой сетке соответствовали бы изначально определённым узлам частотной сетки. Сделан вывод, что учёт скорости движения газа в переносе излучения необходимо производить по крайней мере на этапе расчёта населённостей атомных уровней и выходящего спектра, а при расчёте распределения температуры в аккреционной зоне им можно пренебречь. Показано, что у линий HeII в падающем газе формируется эмиссионный компонент, а у линии HII абсорбционный. У линий нейтрального гелия компонент, связанный с падающим газом, выражен слабо. Линии, возникающие в горячем пятне, испытывают существенное штарковское уширение из-за наличия лобового давления падающего газа на внешнюю границу горячего пятна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-32-00794мол а).

Ключевые слова: Перенос излучения, звёздные атмосферы, аккреция.

ВВЕДЕНИЕ

Классические звёзды типа Т Тельца это молодые звёзды, на поверхность которых происходит аккреция вещества из протопланетного аккреционного диска. Доказано, что в зоне аккреции у поверхности звезды величина магнитного поля составляет несколько килогаусс [Додин и др., 2012; Chuntunov et al., 2007; Donati et al., 2008]. Наличие сильного магнитного поля препятствует непосредственному взаимодействию диска с атмосферой звезды, приводя к формированию магнитосферы, при этом аккреционное течение напоминает масштабированное аккреционное течение на замагниченные нейтронные звёзды. При типичных параметрах молодых звёзд скорость вещества у поверхности звезды при его свободном падении в магнитном поле будет составлять 200...500 км/с, что подтверждается наблюдениями: профили некоторых спектральных линий (например, нейтральных атомов H, O, Na) имеют форму типа обратного профиля P-Cygni, который обрывается с красной стороны на скоростях до 400 км/с. Двигаясь с такой скоростью, вещество тормозится в сильной ударной волне в плотных слоях звёздной атмосферы. Газ, нагретый на фронте ударной волны до ~1 МК, радиационно охлаждается, излучая запас тепла в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом излучении. Это ионизирующее излучение

Додин Александр Владимирович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, dodin_nv@mail.ru

поглощается и переизлучается как в падающем газе, так и в атмосфере звезды. Часть рентгеновского излучения достигала наблюдателя, что позволило непосредственно измерить электронную концентрацию в ударной волне [Kastner et al., 2002; Schmitt et al., 2005], которая согласуется с общепринятым диапазоном плотностей газа перед фронтом ударной волны: $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$. По своей мощности излучение ударной волны сравнимо с потоком излучения, идущим из недр звезды, и, следовательно, значительно влияет на тепловую структуру как атмосферы звезды, подлежащей под ударной волной, так и на тепловую структуру падающего газа. Расчёт структуры звёздной атмосферы, сжимаемой и облучаемой ударной волной, приведён в статье [Додин, 2015]. В этой работе было показано, что в прогреваемой атмосфере возникают так называемые узкие эмиссионные линии, в том числе сильные линии HeI и HeII, которые хорошо заметны в наблюдаемых спектрах.

В указанном выше диапазоне плотностей падающий газ является прозрачным в видимой области спектра, однако на длинах волн короче бальмеровского скачка поглощение в этом газе может оказаться существенным, кроме того, поглощение возрастает с ростом плотности, и при плотности 10^{15} см^{-3} даже в видимой области фотосфера ударной волны будет находиться перед её фронтом. Корректный учёт этого поглощения требует моделирования структуры зоны перед фронтом ударной волны. Более того, это моделирование представляет собой даже больший интерес, чем моделирование прогретой атмосферы. Дело в том, что наличие высоких скоростей и зависимость доплеровских смещений от угла между вектором скорости и лучом зрения делают спектральные линии, формирующиеся в падающем газе, чувствительными индикаторами к геометрии аккреционного течения. При очевидной плодотворности такого моделирования оно до сих пор не было выполнено. Наличие скорости вносит существенные осложнения в расчёты по сравнению с моделированием облучаемой звёздной атмосферы, поскольку требуется учитывать эффекты, вызванные наличием скорости газа: 1) доплеровские смещения между излучениями звёздной атмосферы и падающего газа, 2) адвекция в падающем газе. В данной работе мы подробно остановимся на изучении первого эффекта.

ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ СБЛИЖАЮЩИХСЯ СТЕНОК

В звёздной астрофизике задача переноса излучения в движущихся средах многократно решалась в контексте формирования спектров в расширяющихся оболочках вокруг звёзд, например, в звёздном ветре (см. работы [Barnett et al., 1996; Korčáková, Kubát, 2003; Mihalas, Kunasz, 1986]). Однако разработанные методы для случая звёздного ветра предполагают наличие плавного изменения скорости, напротив, в нашей задаче скорость газа меняется скачком от нескольких сотен километров в секунду до нуля (область горячего газа можно не рассматривать, поскольку она практически не взаимодействует с излучениями моделируемых сред). Вообще говоря, внутри падающего газа, так же как в звёздном ветре, существует градиент скорости: разность скоростей на верхней и нижней границе слоя толщины H равна $\Delta V = 0,5VH/R$, где V — скорость движения газа у поверхности; R — радиус звезды ($\sim 10^{11}$ см). Как и в статье [Додин, 2015] остаёмся в рамках одномерного плоскопараллельного прибли-

жения, т. е. можно моделировать только те слои, для которых H существенно меньше поперечного сечения аккреционной зоны $D \approx 3 \cdot 10^{10}$ см. Забегая вперёд, отметим, что зона ионизованного водорода почти для всех моделей удовлетворяет условию плоскопараллельности. Из приведённых выше характерных размеров нетрудно получить, что при типичном значении $H \approx 10^9$ см разность скоростей на верхней и нижней границе моделируемого слоя будет около 2 км/с, что сопоставимо со скоростью хаотического движения атомов в газе, следовательно, градиентом скорости внутри такого слоя можно пренебречь. Некоторые из наших моделей будут иметь толщину до $H \approx 10^{10}$ см, однако все количественные выводы будут относиться только к тем спектральным линиям, которые формируются в области с $H < 10^9$ см, а именно к линиям HeI и HeII.

Для вычисления распределения температуры и населённостей атомных уровней нам необходимо вычислить моменты поля излучения для каждой частоты и в каждой точке моделируемой структуры:

$$J = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I(\mu) d\mu, \quad H = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I(\mu) \mu d\mu, \quad K = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I(\mu) \mu^2 d\mu,$$

где I — интенсивность; μ — косинус угла, под которым распространяется излучение относительно нормали к плоскости слоя. Интенсивности, входящие в эти выражения, должны быть получены из решения уравнений переноса излучения для двух сближающихся газовых слоёв. На первом шаге решим уравнения переноса излучения сверху вниз для падающего газа с нулевым граничным условием (сверху газ не облучается, ударная волна облучает его снизу), и снизу вверх для прогреваемой атмосферы с ненулевым граничным условием, определяемым так же как при моделировании обычных звёзд:

$$I = B + \mu \frac{dB}{d\tau},$$

здесь B — функция Планка; τ — оптическая толщина. Уравнения переноса решаются методом коротких характеристик [Olson, Kunasz, 1987], в результате получается распределение интенсивности излучения, идущего вниз, в падающем газе $I_{pre}(\mu < 0)$ и распределение интенсивности излучения, идущего вверх, в атмосфере звезды $I_{hs}(\mu > 0)$. Однако величины $I_{pre}(\mu < 0)$ и $I_{hs}(\mu > 0)$ неизвестны. Для их вычисления нам необходимо ещё раз решить уравнения переноса, но уже в противоположных направлениях. В качестве граничных условий будет выступать излучение ударной волны $I_s(\mu)$, к которому нужно добавить уже рассчитанные $I_{pre}(\mu < 0)$ и $I_{hs}(\mu > 0)$, взятые в точке у ударной волны, но смещённые по частоте из-за эффекта Доплера.

Поскольку два слоя сближаются, то излучение каждого из них, наблюдаемое из другого, будет смещено в фиолетовую сторону на величину, пропорциональную $V\mu$, то есть излучение приходящее в слой под разными углами имеет разные доплеровские смещения. Для проведения численных расчётов необходимо определить дискретные сетки по частотам и углам, которые уже не могут оставаться произвольными, поскольку связаны между собой эффектом Доплера: доплеровские смещения, рассчитанные для фиксированной сетки углов, приводят к частотам, которые, вообще говоря, не совпадают с изначально заданными узлами сетки по частоте.

В программе расчёта модели прогреваемой атмосферы для учёта эффекта бланкетирования используется метод выборочной непрозрачности, который заключается в выборе фиксированной сетки из 10 000...100 000 частот. Такая сетка остаётся слишком грубой для описания профилей всех без исключения линий, но достаточно густой для учёта общего их влияния на непрозрачность. В дополнение к этой сетке вводятся точки по частоте, которые позволяют детально прописывать профили всех значимых линий элементов, рассматриваемых с учётом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР). Этот метод может быть легко обобщён на случай с движущимся газом, если задавать динамическую сетку по углам, определяемую из заданной сетки по частоте с помощью соотношения

$$\mu_k = (v_{i+k} - v_i) \frac{c}{V},$$

в котором номер последнего угла определяется из того условия, что $\mu_k \leq 1$. Даже при обычном числе частотных точек ($>30\,000$) удаётся получить достаточную дискретизацию по углам. Интегралы для вычисления моментов поля излучения рассчитываются методом парабол для неравномерной сетки. Единственной проблемой, которая может оказать существенное влияние на интеграл, являются оптически тонкие частоты, в которых интенсивность излучения ведёт себя как $e^{-\tau/\mu}/\mu$, в таких случаях если наименьший угол $\mu_1 = (v_{i+1} - v_i)c/V$ в сетке углов будет много больше оптической толщины τ , то метод парабол неправильно экстраполирует зависимость $I(\mu)$ на малые углы $\mu < \mu_1$, поскольку на всей сетке доминирует расходящийся в нуле множитель $1/\mu$. Этот множитель приводит к переоценке средней интенсивности и отражается на спектрах J в виде заметных артефактов. Для устранения этого эффекта последний угловой интервал $[0, \mu_1]$ разбивается дополнительно на шесть интервалов, равновеликих в логарифмическом масштабе. На этих углах доплеровские смещения составляют величину меньшую шага по частоте и могут быть проигнорированы. Такая процедура позволяет правильно аппроксимировать по отдельным точкам зависимости $I(\mu)$ во всём интервале μ .

Применение вышеописанного метода позволяет одновременно получить густую и самосогласованную дискретизацию по частоте и углам без заметного увеличения расчётного времени в сравнении со случаем, не учитывающим доплеровских сдвигов.

Для получения окончательных граничных условий для уравнения переноса, решаемого в обратном направлении, к смещённым по частоте интенсивностям нужно добавить излучение от ударной волны $I_s(\mu)$. Для оптически тонкой ударной волны $I_s(\mu) \approx 1/|\mu|$. Как уже было отмечено, излучения I_{pre} и I_{hs} не взаимодействуют с горячей областью ударной волны, поэтому структура ударной волны не зависит от деталей структуры падающего газа и прогреваемой атмосферы и может быть исключена из расчёта. Более подробно о структуре ударной волны можно узнать из статьи [Lamzin, 1998], откуда и был заимствован спектр I_s . Поскольку в работе С. А. Ламзина спектр излучения задан на относительно широких спектральных интервалах, то его доплеровскими смещениями на данном этапе следует пренебречь.

Описанный здесь метод вычисления моментов поля излучения не учитывает рассеяния излучения. Поскольку для учёта рассеяния уже нужно знать

среднюю интенсивность J , уравнение переноса из обычного дифференциального переходит в интегро-дифференциальное. Для нашей задачи рассеяние излучения не играет принципиальной роли до тех пор, пока эффективная температура прогреваемой атмосферы не приблизится к характерным температурам О-В звёзд, для которых, как известно, рассеяние играет важную роль. При рассмотренных параметрах эффективная температура составляет менее 10 000 К (см. следующий раздел).

РЕЗУЛЬТАТЫ

После того как вычислены значения всех моментов поля излучения, рассчитывается не-ЛТР структура и спектр обеих зон методами, описанными в статье [Додин, 2015]. Полученное в результате распределение параметров газа представлено на рис. 1. На рисунке видно, что учёт скорости движения газа в уравнениях переноса излучения приводит к некоторым изменениям в распределениях температуры, однако нас в первую очередь интересуют наблюдаемые проявления этих изменений.

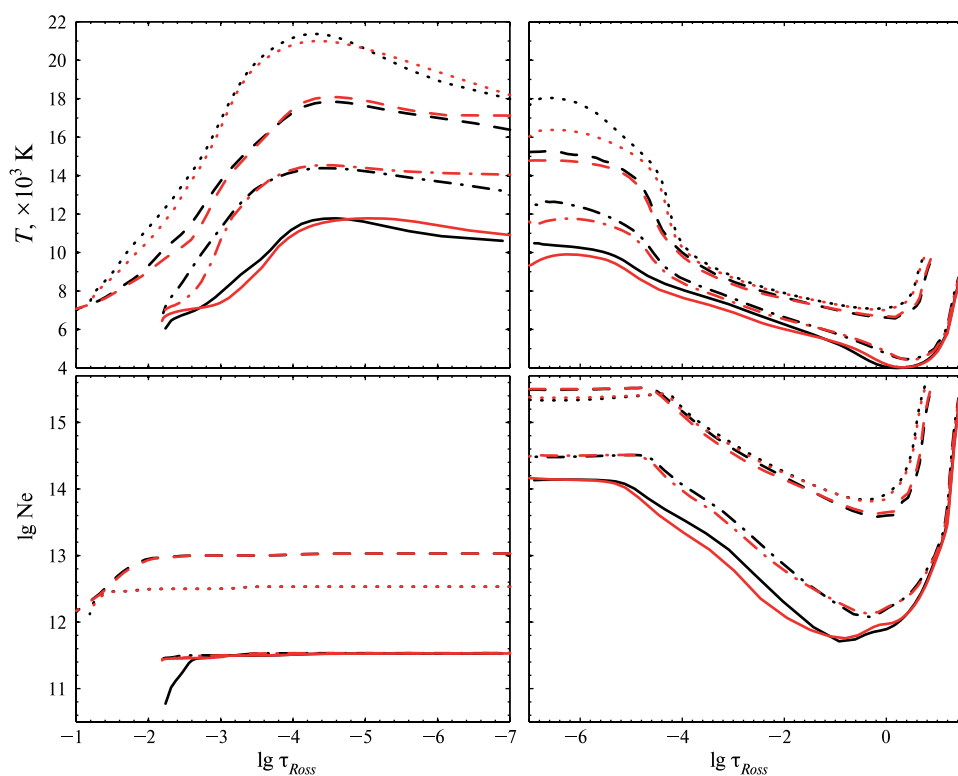


Рис. 1. Распределение температуры и электронной концентрации в падающем газе (слева) и в прогреваемой атмосфере (справа) в моделях, рассчитанных без учёта доплеровских сдвигов (чёрные линии) и с его учётом (красные линии) для различных параметров аккреции. По оси абсцисс отложена росселандова оптическая толщина, отсчитываемая от фронта ударной волны

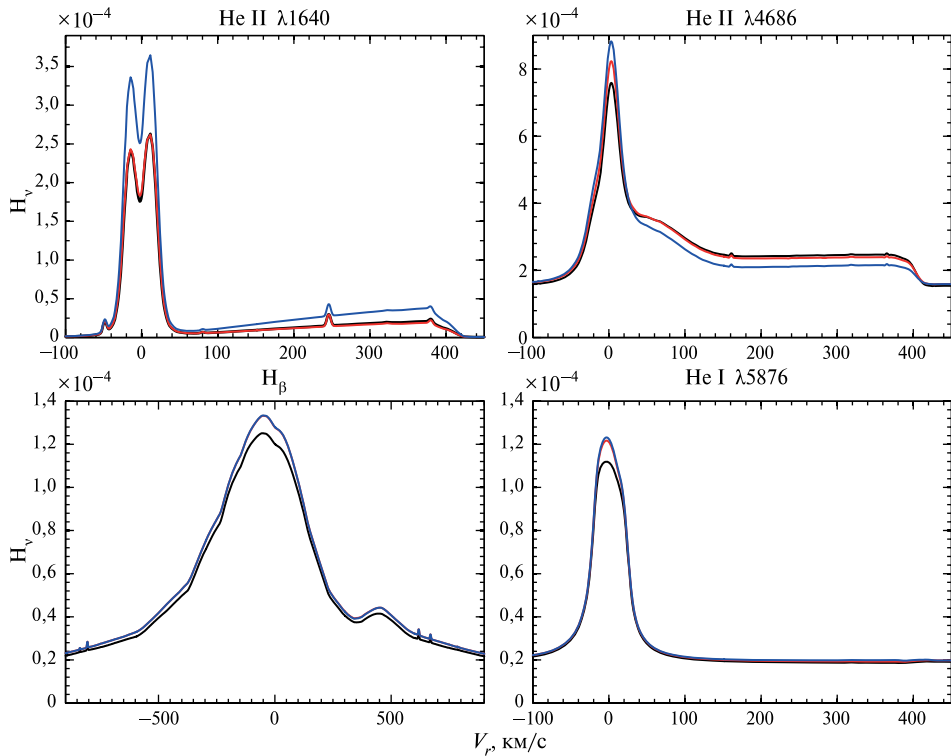


Рис. 2. Профили некоторых спектральных линий, рассчитанных для модели $V = 400$ км/с, $\lg N = 12,5$. Чёрной линией показан спектр для случая, когда доплеровские смещения учитывались как для расчёта структуры, так и для расчёта населённостей уровней. Красной линией показан спектр для случая, когда доплеровские смещения учитывались только при расчёте населённостей уровней, а тепловая структура была получена без учёта скорости газа. Видно, что для всех спектральных линий чёрная и красная кривая отличаются незначительно. Синей линией показан спектр, в котором скорость учитывалась только на последнем этапе: при расчёте выходящего излучения.

По оси ординат отложен эддингтоновский поток в эрг/(с·см²·Гц·стер)

На рис. 2 для модели $V = 400$ км/с, $\lg N = 12,5$ показаны профили некоторых наиболее важных линий: H_{β} , $HeI \lambda 5876 \text{ \AA}$., $HeII \lambda 1640, 4686 \text{ \AA}$.. Из анализа этих рисунков можно сделать несколько выводов:

1. Линия $HeI \lambda 5876$ в рассмотренных моделях не показывает заметного компонента с красной стороны профиля.
2. Линии $HeII$ показывают эмиссионные компоненты, смещённые в красную сторону спектра, качественно интенсивность этих компонент согласуется с наблюдаемой.
3. Для расчёта профилей линий $HeII$ достаточно учитывать доплеровские смещения только на этапе расчёта населённостей уровней.
4. Линии водорода показывают абсорбционную деталь с красной стороны профиля, однако как обсуждалось во введении наши приближения недостаточны для строгого моделирования области, в которой формируется эта абсорбция. Тем не менее, этот профиль приводится здесь

с целью отметить огромную ширину центрального эмиссионного компонента, который образуется в глубоких слоях атмосферы и рассчитывается с достаточной точностью. Такая ширина обусловлена эффектом Штарка в газе горячего пятна, сжатом лобовым давлением ударной волны. Детали учёта штарковского уширения при расчёте профилей линий водорода и гелия описаны в работе [Додин, 2015].

5. Компоненты линий, образующихся в прогреваемой атмосфере, показывают небольшие отличия при учёте/не учёте доплеровских сдвигов, однако на данном этапе такими отличиями можно пренебречь.

ЛИТЕРАТУРА

- [Додин, 2015] Додин А. В. Не-ЛТР моделирование структуры и спектра горячих аккреционных пятен на поверхности молодых звёзд // Письма в Астрон. журн. 2015. Т. 41. С. 219–233.
- [Додин и др., 2012] Додин А. В., Ламзин С. А., Чунтонов Г. А. Магнитное поле молодой звезды RW Aur // Письма в Астрон. журн. 2012. Т. 38. С. 194–207.
- [Baron et al., 1996] Baron E., Hauschildt R. H., Mezzacappa A. Radiative transfer in the comoving frame // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. (MNRAS). 1996. V. 278. P. 763–772.
- [Chuntonov et al., 2007] Chuntonov G. A., Smirnov D. A., Lamzin S. A. New results of magnetic field measurements for BP Tau // Astronomy Letters. 2007. V. 33. P. 38–44.
- [Donati et al., 2008] Donati J.-F., Jardine M. M., Gregory S. G. et al. Magnetospheric accretion on the T Tauri star BP Tauri // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. (MNRAS). 2008. V. 386. P. 1234–1251.
- [Kastner et al., 2002] Kastner J. H., Huenemoerder D. P., Schulz N. S., Canizares C. R. Evidence for Accretion: High-Resolution X-Ray Spectroscopy of the Classical T Tauri Star TW Hydrae // Astrophys. J. 2002. V. 567. P. 434–440.
- [Korčáková, Kubát, 2003] Korčáková D., Kubát J. Radiative transfer in moving media. I. Discontinuous finite element method for one-dimensional atmospheres // Astronomy and Astrophysics (A&A). 2003. V. 401. P. 419–428.
- [Lamzin, 1998] Lamzin S. A. The structure of shock waves in the case of accretion onto low-mass young stars // Astronomy Rep. 1998. V. 42. P. 322–335.
- [Mihalas, Kunasz, 1986] Mihalas D., Kunasz P. B. The computation of radiation transport using Feautrier variables. II. Spectrum line formation in moving media // J. Computational Physics 1986. V. 64. P. 1–26.
- [Olson, Kunasz, 1987] Olson G. L., Kunasz P. B. Short characteristic solution of the non-LTE transfer problem by operator perturbation. I. The one-dimensional planar slab // Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 1987. V. 38. P. 325–336.
- [Schmitt et al., 2005] Schmitt J. H. M. M., Robrade J., Ness J.-U., Favata F., Stelzer B. X-rays from accretion shocks in T Tauri stars: The case of BP Tau // Astronomy and Astrophysics (A&A). 2005. V. 432. P. 35–38.

RADIATIVE TRANSFER IN SPECTRAL MODELING OF MATTER ACCRETING ON THE SURFACE OF YOUNG STARS

A. V. Dodin

Sternberg Astronomical Institute Moscow University (SAI)

The paper is dedicated to the self-consistent non-LTE modelling of the spectrum of the accretion structure at the surface of T Tauri stars. To solve this problem, a generalization of Opacity Sampling technique was proposed in order to account the presence of velocity jump. This modification is based on the following idea that for each frequency node a corresponding angular grid should be chosen in such a way that Doppler shifts on this grid lead to frequencies, which must coincide with the predefined nodes of the frequency grid. The modelling shows that the Doppler shifts should be taken into account at least at calculation of the level populations and emergent spectrum while they can be neglected during calculation of the thermal structure of the accretion region.

It has been shown that HeII lines have red-shifted emission component formed in in-falling gas while hydrogen lines have absorption one. There is no any noticeable red-shifted feature in the HeI lines. Lines formed in the heated atmosphere are significantly broadened by stark effect due to the presence of the ram pressure of the in-falling gas at the outer boundary of the hotspot.

Keywords: radiative transfer, stellar atmosphere, accretion

Dodin Alexandr Vladimirovich — research associate, PhD, dodin_nv@mail.ru

СЕРФОТРОННОЕ УСКОРЕНИЕ ЯДЕР ГЕЛИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

А. Н. Ерохин, В. П. Милантьев

Российский университет дружбы народов (РУДН)

На основе численных расчётов исследовано серфотронное ускорение ядер гелия электромагнитной волной, распространяющейся перпендикулярно магнитному полю в космической плазме. Задача сведена к нелинейному, нестационарному, дифференциальному уравнению второго порядка для фазы волны на траектории частицы. Изучены условия захвата ядра гелия волной в эффективную, потенциальную яму с последующим ультрарелятивистским ускорением. Получены оптимальные условия для реализации ультрарелятивистского серфотронного ускорения ядер гелия электромагнитной волной: черенковский резонанс при взаимодействии волна-частица, благоприятные начальная фаза волны на траектории частицы и знак начального импульса ядра гелия вдоль волнового фронта, превышение амплитудой электрического поля волны некоторого порогового значения. На основе численных расчётов получены асимптотики характеристик ядра гелия (релятивистского фактора частицы, компонент импульса и скорости захваченной частицы, положение дна эффективной потенциальной ямы) при сильном ускорении с ростом её энергии на несколько порядков величины. Согласно проведённым расчётам, на фазовой плоскости для захваченных ядер гелия траектории имеют вид спиралей с особой точкой типа устойчивый фокус. Рассмотрено положение дна эффективной, потенциальной ямы для захваченного ядра гелия и показано, что частица колеблется в области ускоряющих значений электрического поля волны. Для захваченного ядра гелия динамика фазы волны на траектории частицы демонстрирует нелинейные колебания, причём период колебаний медленно возрастает, а их амплитуда убывает по мере роста энергии частицы. Следовательно, захваченные ядра гелия при их ускорении волной конденсируются на дно эффективной, потенциальной ямы.

Указано, что механизм серфотронного ускорения приводит в сравнительно спокойной космической плазме (в отсутствие сильных кризисных процессов типа взрыва сверхновых) к формированию в спектре космических лучей значительных вариаций, обусловленных доускорением малой (порядка процента и меньше) доли частиц в область гораздо больших энергий. Такие вариации наблюдаются экспериментально при обработке данных наблюдений потоков космических лучей. Оценками показано, что в плазме местных межзвёздных облаков энергия захваченных электромагнитными волнами частиц может увеличиться на 6 порядков величины. Рассмотрена эффективность серфотронного ускорения ядер гелия в зависимости от величины фазовой скорости электромагнитной волны.

Ключевые слова: космическая плазма, заряженная частица, электромагнитная волна, резонансное взаимодействие, захват частиц волной, ультрарелятивистское серфотронное ускорение, космические лучи, ядро гелия, эффективная потенциальная яма.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование механизмов генерации потоков ультррелятивистских частиц входит в число актуальных задач физики космической плазмы. Это важно для проблемы происхождения космических лучей (КЛ) включая динамику формирования спектров КЛ, возникновение вариаций потоков КЛ в зависимости от характеристик космической плазмы и др. Серфотронное ускорение зарядов электромагнитными волнами рассматривалось ранее, например, в работах [Буланов, Сахаров, 1986; Грибов и др., 1985; Ерохин и др., 1987, 1989, 2012; Кичигин, 2001; Лозников, Ерохин, 2010; Нейштадт и др., 2009; Dieckmann, Shukla, 2006; Joshi, 1984; Katsouleas, Dawson, 1983]. Согласно расчётам это эффективный механизм генерации потоков ультррелятивистских частиц в относительно спокойной космической плазме с энергиями $1...10^6$ ГэВ и более. Исследование серфинга зарядов на электромагнитных волнах нужно для оценки числа ультррелятивистских ускоренных частиц, характерных размеров области ускорения, энергетических спектров и их вариаций и т. д. Это требует детального анализа условий захвата заряженных частиц в режим серфотронного ускорения, выявления благоприятных (для захвата заряженных частиц) параметров, а также эффективности ускорения частиц при воздействии пространственно локализованных волновых пакетов. Ниже рассмотрено ускорение ядер гелия электромагнитной волной р-поляризации, распространяющейся поперёк внешнего магнитного поля. При этом на частоте верхнего гибридного резонанса ω квадрат показателя преломления плазмы определяется формулой:

$$N^2 = \left(\frac{ck}{\omega} \right)^2 = 1 - \frac{v(1-v)}{1-u^2-v}$$

Здесь $u = \omega_{He}/\omega$; $v = (\omega_{pe}/\omega)^2$, где $\omega_{He} = eH_0/m_e c$ — гирочастота нерелятивистских электронов плазмы; $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi e^2 n_0/m_e}$ — электронная ленгмюровская частота; n_0 — плотность плазмы. В работе рассмотрен случай $u^2 \ll 1$, когда фазовая скорость электромагнитной волны меньше скорости света в вакууме в области безразмерной плотности плазмы v : $1 - u^2 < v < 1$, что соответствует частотам верхнего гибридного резонанса. Захват частиц в режим сильного серфотронного ускорения происходит при поле волны E_0 выше критического значения: $\sigma = eE_0/m_e c\omega > \sigma_c = u\gamma_p = u/\sqrt{1-\beta_p^2}$, здесь $\beta_p = \omega/ck$. Заметим, что нелинейные эффекты взаимодействия ускоряющей волны с плазмой малы, если амплитуда E_0 существенно ниже характерного поля нелинейности т.е. при $\sigma^2 \ll 1$.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ УСКОРЕНИЯ

Рассмотрим релятивистские уравнения движения ядра гелия с массой M в поле электромагнитной волны $E_x = E_0 \cdot \cos \Psi$, где $\Psi = \omega t - kx$. При численных расчётах серфинга задачу упростим, пренебрегая вихревыми компонентами волновых полей E_y, H_z . Расчёты показали, что их учёт не существен. Введём безраз-

мерные величины $\beta = v/c$, $\tau = \varepsilon\omega t$, $\xi = \omega x/c$, где $\varepsilon = \sqrt{m_e/M} \approx 0,012$. Из релятивистских уравнений движения для ядер гелия получаем два интеграла движения: $\gamma\beta_z = \text{const} = h$, $\gamma\beta_y + \varepsilon u\beta_p(\tau - \varepsilon\Psi) = J = \text{const}$. Здесь β_p — безразмерная фазовая скорость волны, причём полагаем $\beta_p < 1$ для реализации черенковского резонанса волна-частица с захватом частицы волной и последующим серфотронным ускорением. Безразмерная скорость ядра гелия в направлении распространения волны определяется выражением $\beta_x = \beta_p(1 - \varepsilon d\Psi/d\tau)$, а фаза волны на траектории частицы связана со смещением ядра гелия вдоль оси x формулой $\Psi = \tau - (\xi/\beta_p)$. Для релятивистского фактора ядра гелия имеем

$$\gamma^2 = \frac{1 + h^2 + [J + \varepsilon u\beta_p \times (\varepsilon\Psi - \tau)]^2}{1 - \beta_x^2}.$$

В итоге фаза волны на траектории частицы подчиняется следующему нелинейному, нестационарному уравнению второго порядка

$$\Psi_{\tau\tau} + \frac{\sigma(1 - \beta_x^2) \times \cos\Psi}{\beta_p\gamma} + \frac{u/\beta_p\gamma^2}{J + \varepsilon u\beta_p \times (\varepsilon\Psi - \tau)} = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) решалось численно на основе программы MathCad с начальными данными в виде $\Psi(0) = \Psi_0$, $\Psi_t(0) = \alpha$. При этом $\beta_x(0) = \beta_p(1 - \alpha)$, где параметр α должен удовлетворять условию $1 - (1/\beta_p) < \alpha < 1 + (1/\beta_p)$. Начальная фаза $\Psi(0)$ выбиралась в интервале $-\pi \leq \Psi(0) \leq \pi$, а для других исходных параметров задачи были взяты значения: $u = 0,2$; $\beta_p = 0,7$; $h = 60$; $\gamma(0)\beta_y(0) = -300$; $\sigma = 1,5\sigma_c$. Начальная энергия ядра гелия соответствовала $\gamma(0) = 428,41$.

Расчёты показали, что при $\alpha = 0$ захват частиц волной в режим серфотронного ускорения происходит сразу почти для 30 % значений $\Psi(0)$ из указанного выше интервала значений. Для захваченных сразу частиц счёт был проведён до $\tau = 5 \cdot 10^6$, когда релятивистский фактор захваченных частиц γ достигает значения порядка $1,2 \cdot 10^4$, что соответствует энергии ускоренных ядер гелия порядка $4 \cdot 10^{13}$ эВ. Приведём некоторые результаты расчётов для случая $\Psi(0) = -0,89$; $\alpha = 0$.

График фазы $\Psi(\tau)$ приведён на рис. 1.

Видно, что на временах τ порядка $6 \cdot 10^5$ ядро гелия выходит на колебания около дна эффективной потенциальной ямы, вариации фазы малы. График функции $\cos(\Psi(\tau))$, определяющей темп ускорения захваченной частицы, дан на рис. 2. Вариации этой функции для τ больше $6 \cdot 10^5$ весьма малы т.е. темп роста энергии частицы фактически постоянен.

График релятивистского фактора $\gamma(\tau)$ захваченного волной ядра гелия приведён на рис. 3.

Как видно на рис. 3, вариации $\gamma(\tau)$ относительно линейной по τ асимптоте практически не видны на графике и темп роста энергии ускоряемой частицы можно считать постоянным. Дополнительно отметим, что поперечные компоненты импульса захваченной частицы также могут быть аппроксимированы линейными по времени τ функциями. Следовательно, при сильном ускорении поперечные компоненты скорости захваченной волной частицы выходят

на постоянные асимптотики следующего вида: $\beta_x(\tau) \approx \beta_p$, $\beta_y(\tau) \gg -1/\gamma_p$. Дополнительно отметим, что с учётом данных асимптотик нелинейное дифференциальное уравнение для фазы волны на траектории захваченной частицы может быть существенно упрощено. Согласно проведённым расчётам при этом вариации полной поперечной скорости захваченной частицы составляют сотые доли процента и меньше. Дополнительно отметим, что с учётом данных асимптотик нелинейное дифференциальное уравнение для фазы волны на траектории захваченной частицы может быть существенно упрощено.

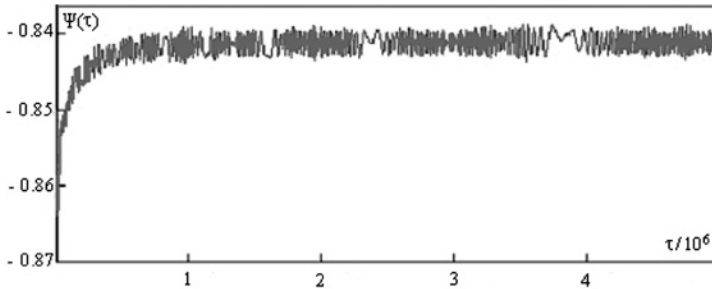


Рис. 1. Динамика фазы волны на траектории захваченной частицы

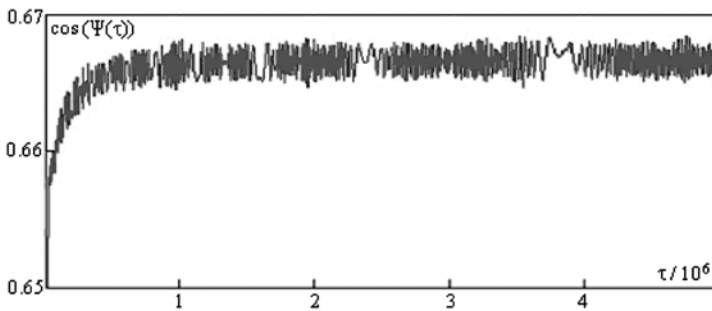


Рис. 2. График функции $\cos(\Psi(\tau))$, определяющей темп ускорения захваченной частицы

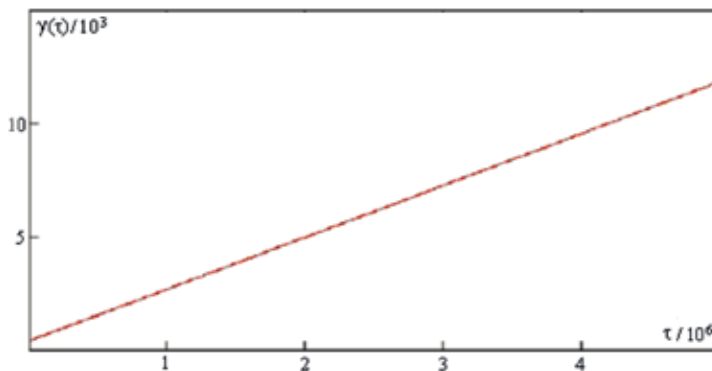


Рис. 3. График релятивистского фактора $\gamma(\tau)$, захваченного волной ядра гелия

Поскольку продольный (относительно внешнего магнитного поля) импульс захваченной частицы, как было выше указано, сохраняется, то продольная скорость ускоряемой частицы будет убывать по мере ускорения обратно пропорционально релятивистскому фактору ядра гелия, т.е. $\beta_z = h/\gamma(\tau)$. Согласно расчётам, на временах порядка $\tau = 5 \cdot 10^6$ величина β_z уменьшается на два порядка величины. Оценки полной поперечной скорости захваченной частицы показали, что в конце интервала расчёта она отличается от скорости света в вакууме на величину порядка 10^{-4} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённых численных расчётов серфотронного ускорения релятивистских ядер гелия электромагнитной волной в космической плазме можно сформулировать следующим образом. В случае релятивистских начальных энергий частицы структура области начальных фаз, благоприятных для реализации серфинга, существенно упрощается. Наиболее эффективно серфотронное ускорение происходит при взаимодействии частиц с электромагнитной волной, имеющей высокую фазовую скорость, когда $\beta_p \approx 1$. В обратном случае — волн с малой величиной β_p , темп ускорения захваченной частицы значительно меньше (на порядок и более).

Следует отметить, что для верхнего гибридного резонанса различие частот волн с высоким и низким темпами ускорения может быть невелико и естественно ожидать, что эффективность серфотронного ускорения будет зависеть от фоновой обстановки.

Проведённые исследования и оценки показывают, что серфотронное ускорение заряженных электромагнитными волнами частиц является локальным источником дополнительной генерации космических лучей как в солнечной гелиосфере, так и в плазме межзвёздных облаков. В плазме межзвёздных облаков характерные длины ускорения порядка долей парсека, а ускорение частиц (протоны, ядра гелия, электроны и др.) возможно до характерных энергий порядка 10^{15} эВ и выше.

ЛИТЕРАТУРА

- [Буланов, Сахаров, 1986] Буланов С. В., Сахаров А. С. Ускорение частиц, захваченных сильной потенциальной волной с искривлённым фронтом в магнитном поле // Письма в Журн. эксперимент. и теор. физики. 1986. Т. 44. Вып. 9. С. 421–423.
- [Грибов и др., 1985] Грибов Б. Э., Сагдеев Р. З., Шапиро В. Д., Шевченко В. И. О затухании плазменных волн и ускорении резонансных электронов в поперечном магнитном поле // Письма в Журн. эксперимент. и теор. физики. 1985. Т. 42. № 2. С. 54–58.
- [Ерохин и др., 1987] Ерохин Н. С., Лазарев А. А., Моисеев С. С., Сагдеев Р. З. Увлечение и ускорение заряженных частиц замедленной волной в неоднородной плазме // Докл. Акад. наук. 1987. Т. 295. № 4. С. 849–852.
- [Ерохин и др., 1989]. Ерохин Н. С., Моисеев С. С., Сагдеев Р. З. Релятивистский серфинг в неоднородной плазме и генерация космических лучей // Письма в Астрон. журн. 1989. Т. 15. № 1. С. 3–10.

- [Ерохин и др., 2012]. *Ерохин А. Н., Ерохин Н. С., Милантёв В. П.* Захват слаборелятивистских электронов в режим серфотронного ускорения электромагнитной волной в космической плазме // *Физика плазмы*. 2012. Т. 38. № 5. С. 435.
- [Кичигин, 2001] *Кичигин Г. Н.* Серфотронный механизм ускорения космических лучей в галактической плазме // *Журн. эксперимент. и теор. физики (ЖЭТФ)*. 2001. Т. 119. Вып. 6. С. 1038–1049.
- [Лозников, Ерохин, 2010] *Лозников В. М., Ерохин Н. С.* Переменный источник избытка космических электронов в гелиосфере // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника*. 2010. № 4(68). С. 121–124.
- [Нейштадт и др., 2009]. *Нейштадт А. И., Артемьев А. В., Зеленый Л. М., Вайнштейн Д. Л.* Серфотронное ускорение в электромагнитных волнах с малой фазовой скоростью // *Письма в Журн. эксперимент. и теор. физики*. 2009. Т. 89. Вып. 9. С. 528.
- [Dieckmann, Shukla, 2006] *Dieckmann M. E., Shukla P. K.* Electron surfing acceleration by the electron two-stream instability in a weak magnetic field // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2006. V. 48. No. 10. P. 1515.
- [Joshi, 1984] *Joshi C.* The surfatron laser-plasma accelerators. Prospects and limitations // *Radiation in plasmas*. 1984. V. 1. Iss. 4. P. 514.
- [Katsouleas, Dawson, 1983] *Katsouleas N., Dawson J. M.* Unlimited Electron Acceleration in Laser-Driven Plasma Waves // *Physical Review Letters*. 1983. V. 51. P. 392. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.51.392>.

SURFATRON ACCELERATION OF HELIUM NUCLEI BY ELECTROMAGNETIC WAVES IN SPACE PLASMA

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

On the basis of numerical calculations it is investigated the surfatron acceleration of helium nuclei by electromagnetic wave propagating perpendicular to the magnetic field in space plasma. The problem is reduced to a nonlinear, non-stationary, the second-order differential equation for the wave phase on the particle's trajectory. The conditions for helium nuclei capture by the wave into an effective, potential well with the following highly-relativistic acceleration of particles are studied. The optimal conditions for the realization of an helium nuclei highly-relativistic surfatron acceleration by electromagnetic wave are determined: Cerenkov resonance in the wave-particle interaction, favorable initial phase of the wave on the particle trajectory and the sign of the initial impulse of helium nuclei along the wave front, the electric field of the wave amplitude exceeding a certain threshold value. On the basis of numerical calculations it was obtained the asymptotic behavior of the characteristics of a helium nucleus (relativistic particles factors, the momentum components and the captured particle velocity, position the bottom of the effective potential well) under hard acceleration as the trapped particles energy increases by several orders of magnitude.

According to the calculations, the phase plane for the trapped helium nuclei trajectory looks like spirals with a singular point of a stable focus type. It is considered the position of the bottom of the effective potential well for the captured helium nuclei and it is shown that the particle is oscillating in the region of accelerating the values of the wave electric field. For the captured helium nucleus the dynamics of wave phase on the particle trajectory demonstrates nonlinear vibrations and oscillations during slow growing, and their amplitude decreases with the particle energy increasing. Consequently, trapped helium nucleus are condensed to the bottom of effective potential well during the particles acceleration.

It is indicated that the mechanism of surfatron acceleration results in a relatively tranquil cosmic plasma (in the absence of strong crisis processes such as the explosion of supernovae)

to the formation of the cosmic ray spectrum significant variations due to strong acceleration of the small (about one percent or less at the initial energy) the part of particles in the region of much higher energies. Such variations are observed experimentally in the treatment of cosmic rays observations. The evaluation showed that in the plasma of the local interstellar clouds the particles captured by electromagnetic waves may increase their energy by 6 orders of magnitude. It is considered the efficiency of surfatron acceleration of helium nuclei depending on the magnitude of electromagnetic wave phase velocity.

Keywords: cosmic plasma, a charged particle, the electromagnetic wave, the resonant interaction, capture of particles, wave surfatron ultrarelativistic acceleration, cosmic rays, the helium nucleus, the effective potential well.

Erokhin Aleksei Nikolaevich — aspirant, benkatz2x2@gmail.com

Milantiev Vladimir Petrovich — professor, doctor of physical and mathematical sciences, vmilant@mail.ru

МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ АККРЕЦИОННОГО ДИСКА В ШИРОКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ 4U 1543–47 ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ 2002 ГОДА

К. Л. Маланчев, Г. В. Липунова

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ)

Представлены результаты расчёта кривой блеска рентгеновской новой системе 4U 1543–47 2002 г. в рамках численной модели вязкой эволюции горячего диска. В пике рентгеновская новая находилась в мягком спектральном состоянии с преобладающим вкладом диска в полный рентгеновский поток. Аккреционный диск в системе 4U 1543–47 с орбитальным периодом около 27 ч может достигать размеров порядка пяти радиусов Солнца. Проведено численное моделирование эволюции тонкого диска с учётом облучения далёких частей диска центральным рентгеновским излучением. Моделирование захватывало как стадию роста рентгеновской светимости, так и стадию её спада. В рамках этой модели после пика светимости область диска с горячим ионизованным веществом постепенно уменьшалась в размере, поскольку температура в диске падала со временем. Для различных значений массы и спина чёрной дыры получены оценки на параметр турбулентности α в горячем диске в предположении, что она значительно превосходит α в диске с неионизованным веществом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-91345).

Ключевые слова: аккреция, аккреционный диск, чёрная дыра, рентгеновский источник, рентгеновская новая.

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская новая 4U 1543–47 (V* IL Lup) — это маломассивная рентгеновская двойная система (Low-Mass X-ray Binaries, LMXB) [Черепашук, 2013; Ritter, Kolb, 2003], в которой идёт аккреция на более массивный компонент и происходят мощные вспышки примерно раз в 10 лет, наблюдаемые в рентгеновском, оптическом, инфракрасном (ИК) и радиодиапазонах. Компактный объект в центре аккреционного диска является надёжным кандидатом в чёрные дыры. Орбитальный период этой LMXB $P_{orb} \approx 1,116$ дня — заметно больше, чем у некоторых других известных рентгеновских новых, тоже содержащих кандидаты в чёрные дыры: например, A 0620–00, GS 1124–68, GS 2000+25, GRO 0422+32 имеют период двойной порядка 10 ч и меньше. Оптический компаньон — звезда класса A2V, масса которой может быть $M_{opt} \approx 2,5M_{\odot}$. Масса чёрной дыры оценивается как $M_x = (2,7...7,5)M_{\odot}$ [Orosz et al., 1998] или же $M_x = (9,4 \pm 2)M_{\odot}$ [Orosz et al., 2002], $M_x = (8,4...10,4)M_{\odot}$ [Orosz, 2003], наклонение $i \approx 21 \pm 1,5$. Безразмерный параметр вращения Керра чёрной дыры оценивался из анализа рентгеновского спектра $a = 0,8 \pm 0,1$ [Shafee et al., 2006] и $a = 0...0,5$ [Morningstar, Miller, 2014; Zimmerman et al., 2005]. Расстояние до системы составляет $9,1 \pm 1$ кпк (рис. 1–3).

Маланчев Константин Леонидович — аспирант, ведущий программист, malanchev@physics.msu.ru

Липунова Галина Владимировна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

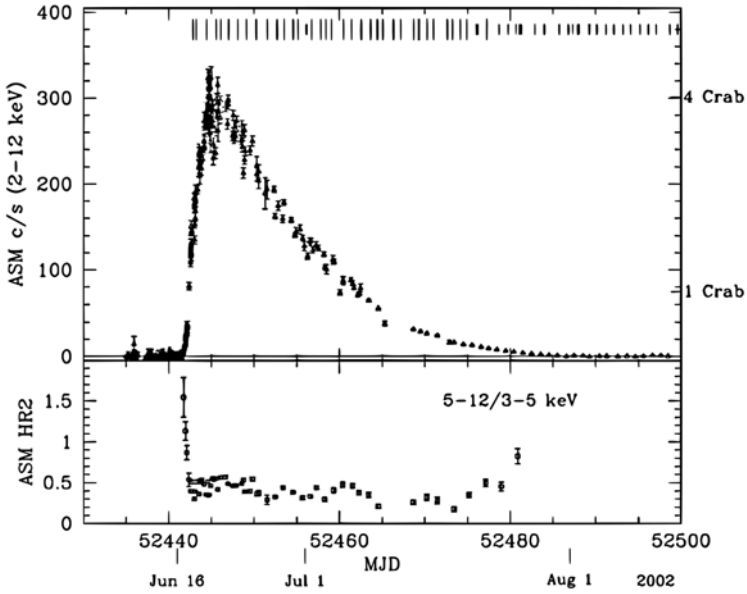


Рис. 1. Кривая блеска 4U 1543–47 в диапазоне 2...12 кэВ, полученная обсерваторией ASM (Fig. 1 из работы [Park et al., 2004])

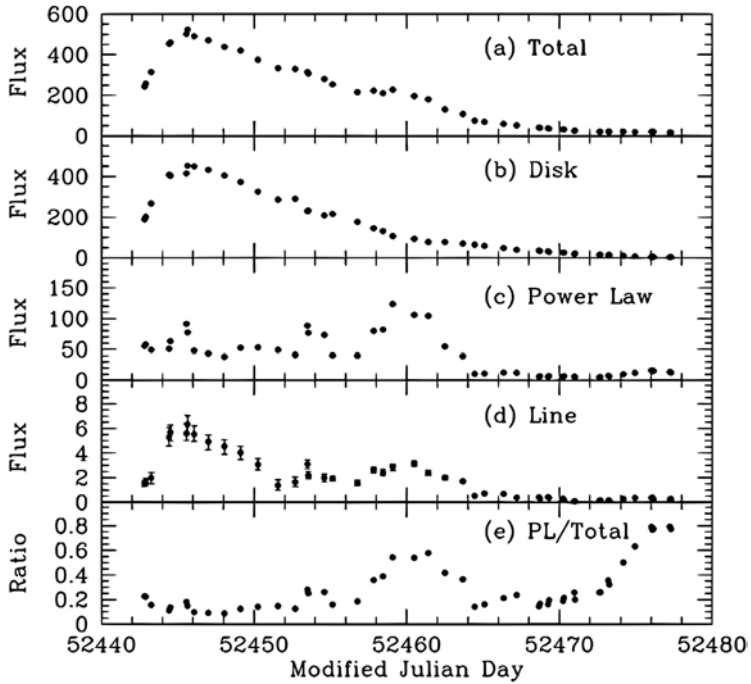


Рис. 2. Вклад различных компонент в рентгеновскую кривую блеска 4U 1543–47 (Fig. 2 из работы [Park et al., 2004]). Сверху вниз: полный поток, поток от диска, поток от степенной компоненты, поток в линии K α железа, отношение степенного потока к полному

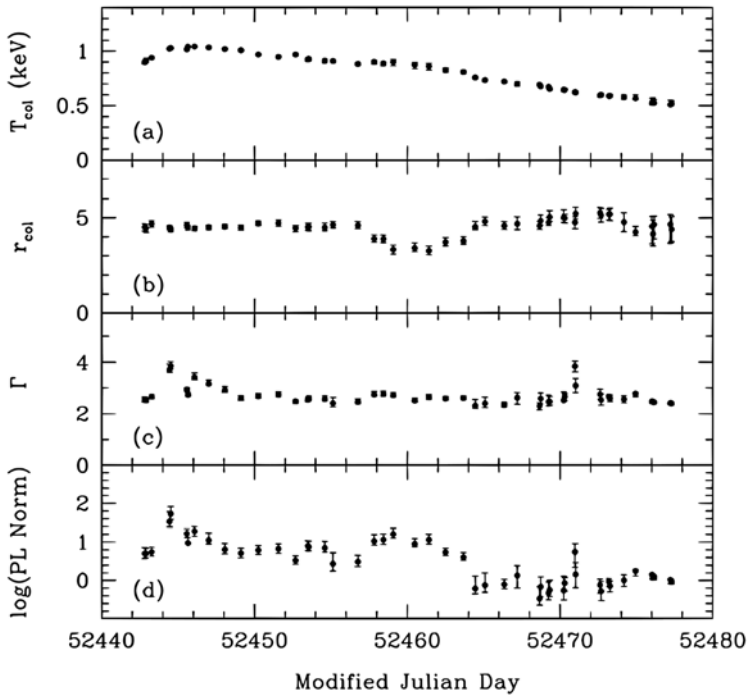


Рис. 3. Эволюция параметров спектрального моделирования (Fig. 3 из работы [Park et al., 2004]): эволюция цветовой температуры (вверху); эволюция внутреннего радиуса диска (внизу)

1. НАБЛЮДЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Парк С. К. с коллегами [Park et al., 2004] провели спектральное моделирование наблюдений вспышки 4U 1543 2002 г. на орбитальной рентгеновской обсерватории Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) прибором монитор всего неба (All-Sky Monitor, ASM) (рис. 1–3). Два параметра модели diskbb в пакете программ XSPEC r_{col} и T_{col} определяют компоненту рентгеновского излучения, которая предположительно излучается многоцветным диском. Внутренний радиус диска $r_{col} \approx 2,2R_{in}$ [Zimmerman et al., 2005] показывает постоянство в районе пика, R_{in} — радиус последней устойчивой орбиты вокруг чёрной дыры. Характерное время на спаде вспышки $t_{exp} \approx 15$ дней, определённое по $T_{in} \propto \dot{M}^{1/4} \propto \exp\{t/4t_{exp}\}$.

2. МОДЕЛИ ВЯЗКОЙ ЭВОЛЮЦИИ АККРЕЦИОННОГО ДИСКА

Эффективный размер полости Роша чёрной дыры оценивается как $R_{RL} \approx (4,2...5,3)R_{\odot}$ для диапазона $M_x = (6...10)M_{\odot}$. Если предположить, что размер аккреционного диска вокруг чёрной дыры ограничен приливным взаимо-

действием, получим $R_{tid} \approx 0,8R_{RL}$ [Paczynski, 1977; Suleimanov et al., 2008]. Если предположить, что эволюция темпа аккреции в пике вспышки определяется характером эволюции вязкого аккреционного диска, то по формуле из работы [Lipunova, 2015] получаем оценку параметра α для данной вспышки:

$$\alpha = 0,15 \left(\frac{r_{out}}{2R_{\odot}} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{z_0/r}{0,05} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{M_x}{10M_{\odot}} \right)^{-1/2} \cdot \left(\frac{t_{exp}}{30^d} \right)^{-1} \times \Pi_1 \Pi_3 \approx 5,5 \left(\frac{M_x}{10M_{\odot}} \right)^{-1/2},$$

где z_0 соответствует полутолщине диска на внешнем радиусе, а параметрами $\Pi_1 \times \Pi_3 \approx 6$ (рассчитаны в работе [Ketsaris, Shakura, 1998]) проведён учёт неоднородной вертикальной структуры диска для $\dot{M} \approx 10^{18}$ г/с.

Рассмотрим модель, согласно которой вспышка в рентгеновской новой инициируется тепловой неустойчивостью в диске, связанной с наличием резкого скачка непрозрачностей вещества в области плотностей и температур, при которых происходит ионизация водорода (см., например, обзор [Lasota, 2001]). Эта тепловая неустойчивость приводит к переходу вещества в диске за характерное тепловое время (т.е. быстрее, чем характерное вязкое время) из «холодного» состояния (неионизованный газ) в «горячее» состояние (ионизованный газ) и имеет характер «тепловой волны», распространяющейся радиально по диску. Предположим, что во время вспышки 2002 г. внешняя часть аккреционного диска вокруг чёрной дыры оставалась в холодном состоянии, то есть тепловая волна не распространилась по всему диску. Такой сценарий может реализоваться, так как для данного распределения поверхностной плотности и температуры в диске в низком состоянии существует ограниченный интервал радиусов, на котором тепловое возмущение способно перевести вещество из холодного в горячее состояние [Lasota, 2001].

На основе моделирования наблюдений карликовых новых известно, что параметр турбулентной вязкости α_{cold} для диска в холодном состоянии на порядок или более отличается от α_{hot} [Lasota, 2001]. В холодном диске пропорционально возрастает вязкое время, так как $t_{vis} \propto 1/\alpha$. Поэтому мы можем работать в рамках предположения, что во время вспышки внешние части диска, которые остались в холодном состоянии, эволюционируют настолько медленно, что это практически «незаметно» для внутренних горячих частей диска [Lipunova, Shakura, 2003].

Вязкая эволюция аккреционного диска описывается уравнением типа диффузии [Lipunova, Shakura, 2000]:

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{(GM_x)^2}{h^3} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial h^2},$$

где $h \equiv \sqrt{GM_x r}$ — удельный момент вязких сил; Σ — поверхностная плотность; F — момент вязких сил между соседними слоями диска. Условие равенства нулю вязких напряжений на внутренней границе диска даёт граничное условие $F_{in} = 0$. Мы предполагаем, что через границу между холодным и горячим диском не перетекает вещество, тогда вторым граничным условием будет

$$\dot{M}_{out} \equiv \left. \frac{\partial F}{\partial h} \right|_{out} = 0.$$

Связь между двумя неизвестными функциями $F(h, t)$ и $\Sigma(h, t)$ устанавливается из решения уравнений вертикальной структуры аккреционного диска. Используется аналитическое решение из работы [Ketsaris, Shakura, 1998] для закона непрозрачностей аккрецирующего вещества, описываемого соотношением $\kappa = 6,45 \cdot 10^{22} \rho / T^{2,5}$. Данное соотношение хорошо описывает поведение усреднённого по Росселанду коэффициента непрозрачности для температуры $10^4 \dots 10^5$ К, характерных для вещества во внешних частях горячего диска.

В качестве начального условия принят линейный закон зависимости поверхностной плотности от радиальной координаты $\Sigma \propto r$, что для выбранного закона непрозрачностей соответствует радиальному распределению момента вязких сил $F \propto h^6$. Расчёт эволюции этих величин проводился путём численного решения уравнения (2) с учётом движения границы горячего диска вглубь диска. Граница горячего диска определяется из условия на эффективную температуру поверхности диска $T_{eff} = 10^4$ К.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

На рис. 4 и 5 изображена эволюция момента вязких сил F и поверхностной плотности Σ в диске с момента, когда диск находился в низком состоянии ($\alpha_{cold} = \alpha_{hot} / 30$) до пика (~ 7 дней) и на спадающей ветви ($t = 20$ дней). Изображено, что в низком состоянии диск находится в нестационарном состоянии и $\Sigma \propto r$. Видно, что уже в пике вспышки распределение Σ в диске соответствует распределению, которое получается в модели стационарного диска $\Sigma \propto r^{-3/4}$ и $F \propto \sqrt{r}$, что является универсальным свойством нестационарных вязких дисков во вспышках [Lipunova, 2015]. Видно, что радиус горячей зоны диска уменьшается (кривые заканчиваются на радиусе, соответствующему размеру горячей области диска в соответствующий момент времени).

На рис. 6 показано моделирование внутренней температуры диска T_{in} и сравнение с данными работы [Park et al., 2004]. Модель диска с центральной горячей зоной переменного радиуса удовлетворительно описывает наблюдаемые точки. Модель диска с постоянным радиусом не способна объяснить ход кривой. Также приведена кривая, рассчитанная согласно аналитической модели диска с постоянным радиусом [Lipunova, Shakura, 2000], которая может удовлетворительно описать наблюдаемые точки только в первую декаду после пика.

На рис. 7 показана зависимость параметра α , который мы получили в процессе минимизации расхождения модельной и наблюдаемой кривой, от массы чёрной дыры. При моделировании температуры было учтено, что $T_{in, diskbb} = T_{col} / f_{col}$, а также что $T_{in, diskbb}$ больше $T_{max, SS}$ на 5 % [Zimmerman et al., 2005]. Кроме того, на этом рисунке показаны значения параметра α для модели $M_x = 6 M_\odot$ и моделей с постоянным радиусом горячего диска в один и два солнечных радиуса.

Для этой же массы показаны значения α для модели с облучением внешних частей диска рентгеновским излучением, приходящим из его внутренних областей. Эффективная температура T_{eff} с учётом облучения записывается следующим образом:

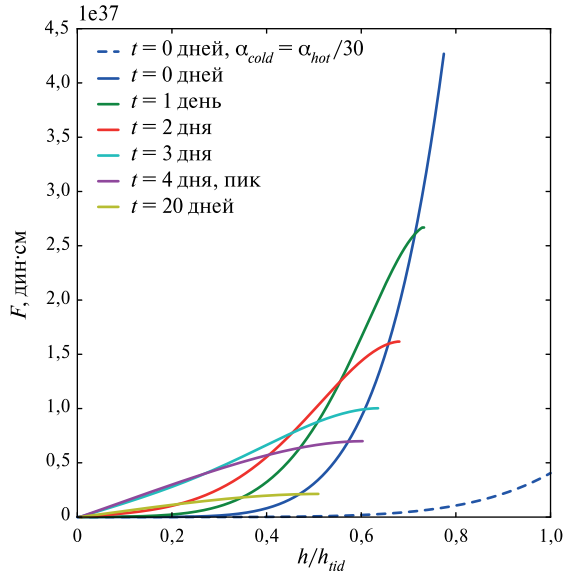


Рис. 4. Эволюция профиля момента вязких сил F для модели с $M_x = 8M_\odot$ и $\alpha = 0,71$ с момента, когда диск находится в холодном состоянии ($t = 0$ дней) до пика ($t = 7$ дней), и на спадающей ветви. По горизонтальной оси отложен удельный момент вязких сил h , нормированный на его значение на приливном радиусе h_{tid} : профиль момента вязких сил в холодном состоянии ($\alpha_{cold} = \alpha_{hot}/30$) — штриховая синяя линия; профиль момента вязких сил горячего диска сразу после перехода в высокое состояние — сплошная синяя линия

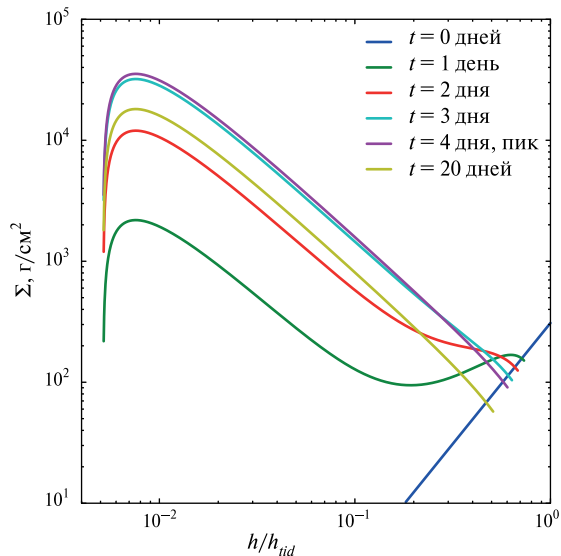


Рис. 5. Эволюция профиля поверхностной плотности Σ для модели с $M_x = 8M_\odot$ и $\alpha = 0,71$ с момента, когда диск находится в холодном состоянии ($t = 0$ дней) до пика ($t = 7$ дней), и на спадающей ветви. По горизонтальной оси отложен удельный момент вязких сил h , нормированный на его значение на приливном радиусе h_{tid}

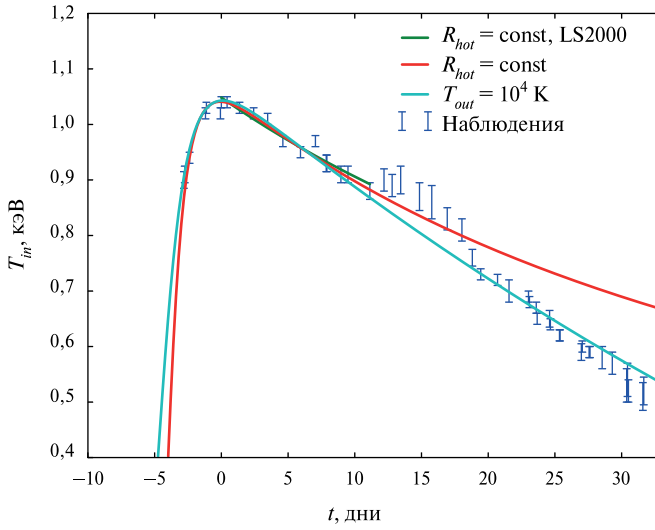


Рис. 6. Эволюция цветовой температуры внутренней части диска как параметра спектральной модели diskbb: аналитическое решение в рамках модели [Lipunova, Shakura, 2000] для $\alpha = 0,65$ — толстая зелёная линия; модель с постоянным радиусом горячего диска и $\alpha = 0,71$ — красная линия; модель для $\alpha = 0,71$ с бегущем внутрь радиусом горячего диска, эффективная температура на котором составляет 10^4 К — бирюзовая линия. Модели построены для массы чёрной дыры $M_x = 8M_\odot$; для первых двух моделей радиус диска постоянен и равен $r_{out} = 1,456R_\odot$, что соответствует радиусу горячего диска в максимуме блеска для третьей модели: результаты спектрального моделирования из работы [Park et al., 2004] — синий цвет

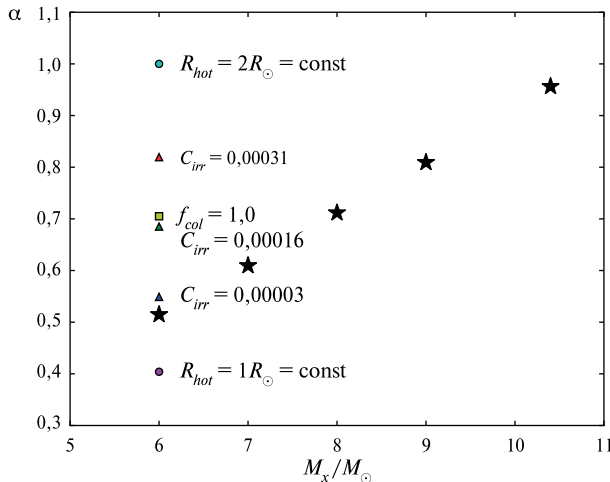


Рис. 7. Зависимость параметра α от массы чёрной дыры M_x : значения α для модели с бегущем радиусом, значением $f_{col} = 1,7$ и без учёта облучения — чёрные звёздочки; модели с облучением с различными фактором C_{irr} (пояснения в тексте) — треугольнички; модели, в которых радиус диска считался постоянным и равным одному и двум радиусам Солнца — кружки. Квадратом показана модель с минимально возможным коэффициентом $f_{col} = 1$

$$T_{eff} = \left(T_{vis}^4 + T_{irr}^4 \right)^{1/4}, \quad T_{vis}^4 = \frac{3\sqrt{GM_x}}{4\sigma_{SB}} \cdot \frac{F}{r^{7/2}}, \quad T_{irr}^4 = C_{irr} \frac{1}{\sigma_{SB}} \cdot \frac{L_x}{4\pi r^2},$$

где σ_{SB} — постоянная Стефана-Больцмана; L_x — рентгеновская светимость диска; C_{irr} — параметр перехвата облучения.

В расчётах использовалось значение $f_{col} = 1,7$ [Shimura, Takahara, 1995]. На рис. 7 видно, что уменьшение этого параметра до его минимального значения $f_{col} = 1$ приводит к увеличению параметра α .

4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА КЕРРА НА ПОЛУЧЕННЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Если предположить, что параметр Керра $a \approx 0,6$ [Li et al., 2005], получающиеся значения α могут стать ниже. Коэффициент полезного действия (КПД) аккреции на чёрную дыру с таким параметром Керра больше на $\sim 30\%$, чем КПД, которое брало взято в нашем моделировании (1/12). В результате, темп аккреции в диске может понизиться и поэтому уменьшится зона горячего диска по сравнению с моделью в ньютоновской метрике. С другой стороны, облучение центральным рентгеновским потоком внешних частей диска приводит к дополнительному нагреву. Учёт облучения будет сдвигать оценку на α в большую сторону. Моделирование эволюции горячего диска с переменным радиусом в 4U 1543 вокруг чёрной дыры с ненулевым параметром Керра и с облучением будет дальнейшим развитием нашей модели.

5. ВТОРИЧНЫЙ ПИК

Бакстон М. М. и Байлин С. Д. [Buxton, Bailyn, 2004] провели анализ спектра источника во время вторичного пика (~ 15 дней после главного пика) по данным в радио-, инфракрасном, оптическом и рентгеновском диапазонах. Вторичный пик оказался намного более выраженным в ИК-диапазоне, чем в оптическом. Из анализа спектрального распределения авторы заключают, что вторичный пик обязан синхротронному излучению джета. Таким образом, можно сделать предположение, что одновременный подъём кривой $T_{col}(t)$ при $t \approx 15$ дней является артефактом спектрального моделирования: в спектре источника усиливается дополнительная нетепловая компонента (коррелирующая с джетом), которая некорректно учитывается при моделировании только двумя компонентами (diskbb и power-law). Отметим, что природа вторичных пиков на кривых блеска рентгеновских новых до сих пор загадочна. Существует гипотеза, согласно которой пик на спаде обязан дополнительному впрыску вещества (см. анализ и моделирование кривой блеска А 0620–00, проведённый в работе [Malanchev, Shakura, 2015]).

Излучение джета является альтернативной гипотезой, объясняющей вторичные пики на кривых блеска рентгеновских новых. В источнике 4U 1543–47 низкочастотные наблюдения косвенно подтверждают эту гипотезу. Таким образом, на вид кривой $T_{in}(t)$ влияют изменения формы спектра в рентгене в момент усиления джета, что не может быть непосредственно объяснено изменением темпа аккреции в рамках модели вязкой эволюции диска.

ВЫВОДЫ

Для объяснения вспышки 4U 1543-47 2002 г. нами предложена модель диска, в которой вязкая эволюция проходит в горячей области диска, радиус которой уменьшается с уменьшением центрального темпа аккреции. Вокруг этой зоны вещество находится в холодном состоянии и практически не оказывает влияния на эволюцию распределения плотности в горячей зоне. Проведены расчёты с использованием численного кода. Показано, что модель вязкого диска с постоянным диском не соответствует профилю кривой $T_{col}(t)$. В рамках модели горячей зоны переменного радиуса удаётся воспроизвести ход $T_{in}(t)$ и значения для параметра турбулентной вязкости $\alpha < 1$. Построена зависимость оценки α от массы чёрной дыры.

ЛИТЕРАТУРА

- [Липунова, Шакура, 2003] *Липунова Г. В., Шакура Н. И.* Модель вторичного пика на кривых блеска рентгеновских Новых // Известия РАН. Сер. Физическая. 2003. Т. 67. P. 322–327.
- [Черепашук, 2013] *Черепашук А. М.* Тесные двойные звёзды. М.: Физматлит, 2013.
- [Buxton, Bailyn, 2004] *Buxton M. M., Bailyn C. D.* The 2002 Outburst of the Black Hole X-Ray Binary 4U 1543-47: Optical and Infrared Light Curves // *Astrophysical J. (ApJ)*. 2004. V. 615. No. 2. P. 880.
- [Ketsaris, Shakura, 1998] *Ketsaris N. A., Shakura N. I.* On the Calculation of the Vertical Structure of Accretion Discs // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 1998. V. 15. P. 193.
- [Lasota, 2001] *Lasota J.-P.* The disc instability model of dwarf novae and low-mass X-ray binary transients // *New Astronomy Reviews*. 2001. V. 45. Iss. 7. P. 449–508.
- [Lipunova, 2015] *Lipunova G. V.* Evolution of finite viscous disks with time-independent viscosity // *Astrophysical J. (ApJ)*. 2015. V. 804. P. 87.
- [Lipunova, Shakura, 2000] *Lipunova G. V., Shakura N. I.* New solution to viscous evolution of accretion disks in binary systems // *Astronomy and Astrophysics (A&A)*. 2000. V. 356. P. 363–372.
- [Malanchev, Shakura, 2015] *Malanchev K., Shakura N.* Vertical Convection in Turbulent Accretion Disks and Light Curves of the X-ray Nova A0620-00 1975 Outburst // *Astronomy Letters*. 2015. V. 41. No. 12. P. 797–808.
- [Morningstar, Miller, 2014] *Morningstar W. R., Miller J. M.* The spin of the black hole 4U 1543-47 // *Astrophysical J. Letters*. 2014. V. 793. P. L33. doi: 10.1088/2041-8205/793/2/L33.
- [Orosz et al., 1998] *Orosz J. A., Jain R. K., Bailyn C. D., McClintock J. E., Remillard R. A.* Orbital Parameters for the Soft X-Ray Transient 4U 1543-47: Evidence for a Black Hole // *Astrophysical J. (ApJ)*. 1998. V. 499. P. 375–384.
- [Orosz et al., 2002] *Orosz J. A., Polisenky E. J., Bailyn C. D., Tourtellotte S. W., McClintock J. E., Remillard R. A.* Revised parameters for the black hole binary 4U 1543-47 // *American Astronomical Society. 201st AAS Meeting: Abstracts*. 2002. V. 34. P. 1124.
- [Orosz, 2003] *Orosz J. A.* Inventory of Black Hole Binaries // *IAU Symp. A Massive Star Odyssey: From Main Sequence to Supernova* / Eds. van der Hucht K., Herrero A., Esteban C. 2003. V. 212. P. 365. arXiv:astro-ph/0209041.
- [Paczynski, 1977] *Paczynski B.* A Model of Accretion Disks in Close Binaries // *Astrophysical J. (ApJ)*. 1977. V. 216. P. 822–826.

- [Park et al., 2004] *Park S. Q., Miller J. M., McClintock J. E.* et al. Spectral and Timing Evolution of the Black Hole X-Ray Nova 4U 1543–47 during Its 2002 Outburst // *Astrophysical J. (ApJ)*. 2004. V. 610. P. 378.
- [Ritter, Kolb, 2003] *Ritter H., Kolb U.* Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Seventh edition) // *Astronomy and Astrophysics (A&A)*. 2003. V. 404. P. 301–303.
- [Shafee et al., 2006] *Shafee R., McClintock J. E., Narayan R., Davis S. W., Li L.-X., Remillard R. A.* Estimating the Spin of Stellar-Mass Black Holes by Spectral Fitting of the X-Ray Continuum // *Astrophysical J. Letters*. 2006. V. 636. No. 2. P. L113.
- [Shimura, Takahara, 1995] *Shimura T., Takahara F.* On the Spectral Hardening Factor of the X-ray Emission from Accretion Disks in Black Hole Candidates // *Astrophysical J. (ApJ)*. 1995. V. 445. P. 780–788.
- [Suleimanov et al., 2008] *Suleimanov V. F., Lipunova G. V., Shakura N. I.* Modeling of non-stationary accretion disks in X-ray novae A 0620-00 and GRS 1124-68 during outburst // *Astronomy and Astrophysics (A&A)*. 2008. V. 491. P. 267–277.
- [Zimmerman et al., 2005] *Zimmerman E. R., Narayan R., McClintock J. E., Miller J. M.* Multi-temperature Blackbody Spectra of Thin Accretion Disks with and without a Zero-Torque Inner Boundary Condition // *Astrophysical J. (ApJ)*. 2005. V. 618. P. 832–844.

VISCOUS EVOLUTION OF ACCRETION DISC IN WIDE X-RAY NOVA 4U 1543–47 DURING ITS 2002 OUTBURST

K. L. Malanchev, G. V. Lipunova

Sternberg Astronomical Institute, Moscow Lomonosov State University (SAI)

We present results of light curve simulations of X-ray Nova 4U 1543–47 2002 outburst in the framework of a numerical model of viscous evolution of the hot accretion disc. The peak of the X-ray luminosity corresponds to the soft spectral state with a prevailing contribution of disc X-ray in the total X-ray flux. The accretion disc in 4U 1543–47 with an orbital period of about 27 hours can reach sizes of about five Solar radii. We provide a numerical simulation of the evolution of the thin accretion disc taking into account the radiation of distant parts of the disc by the central X-ray radiation. The simulation captures both the growth stage of the X-ray luminosity, and the phase of its decline. In our model, after the peak of the X-ray luminosity area of the disc with hot ionized substance gradually decreases in size as the temperature in the disc decreases with time. Assuming turbulence parameter α in the cold disc is much smaller than α in the hot disc we obtained estimates for hot disc α for different values of mass and Kerr parameter of the black hole.

Keywords: accretion, accretion disc, black hole, X-ray source, X-ray Nova

Malanchev Konstantin Leonidovich — postgraduate student, leading programmer, malanchev@physics.msu.ru

Lipunova Galina Vladimirovna — research associate, PhD

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ СО СЛУЧАЙНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ГАЛАКТИК

Е. А. Михайлов¹, Д. А. Грачев^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ)

² Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

Эволюция крупномасштабных магнитных полей в галактиках связана с так называемым механизмом динамо, основанным на дифференциальном вращении и альфа-эффекте. При изучении галактик, в которых происходят такие процессы, как взрывы сверхновых, звёздообразование и т.д. возникает необходимость рассмотрения уравнений теории динамо, включающих случайные коэффициенты. Ранее было исследовано поведение решений и их статистических моментов, показано наличие перемежаемости (когда старшие моменты растут быстрее младших). Немаловажно исследовать также корреляционную функцию, которая позволяет связать значения магнитного поля в различные моменты времени.

Исследовано модельное уравнение Якоби, которое воспроизводит основные качественные свойства галактического динамо. Коэффициент в нём зависел от времени по кусочно-постоянному закону: на каждом из небольших интервалов он принимал случайные значения, после чего обновлялся. С помощью численного моделирования получена как сама корреляционная функция, так и её нормированная модификация. В условиях экспоненциально растущих решений нормированный вариант позволяет более чётко показать, насколько сильно связаны значения функции в разные моменты времени. При малых временах данная функция близка к постоянной, после чего совершает несколько колебаний и затем падает практически до нуля.

Кроме этого, исследована корреляционная функция для более простого стохастического дифференциального уравнения первого порядка, которое позволяет получить не только численный результат, но и асимптотические оценки. Получено, что при небольших временах теоретические предсказания совпадают с результатами численного моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-32-00056 мол_а).

Ключевые слова: магнитные поля галактик, теория динамо, случайные коэффициенты.

ВВЕДЕНИЕ

В различных физических задачах встречаются уравнения со случайными коэффициентами. Одним из таких примеров являются уравнения галактического динамо, описывающего эволюцию крупномасштабного магнитного поля в галактиках [Arshakian et al., 2009]. Как правило, они содержат кинематические параметры межзвёздного газа, усреднённые по всему диску. Этот подход оправдан в случае «спокойных» галактик, где не происходит активных процессов, таких как звёздообразование, взрывы сверхновых и т.п. При рассмотрении объектов, где межзвёздная среда быстро и сильно меняется, оказывается

Михайлов Евгений Александрович — ведущий программист, кандидат физико-математических наук, ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Грачев Денис Александрович — научный сотрудник, доцент, кандидат физико-математических наук

эффективным их моделирование с помощью дифференциальных уравнений, содержащих случайные коэффициенты.

Вообще говоря, модель галактического динамо в простейшем случае содержит систему из двух дифференциальных уравнений первого порядка по времени, описывающих две основных компоненты магнитного поля (радиальную и угловую). Нередко в соответствующих задачах полагают случайным коэффициент, отвечающий за альфа-эффект (характеризующий турбулентные движения), однако есть предпосылки к тому, чтобы считать, что коэффициент диффузии также меняется случайным образом. Изучение этого вопроса представляет отдельный интерес, при этом качественное поведение магнитного поля может быть описано намного более простым уравнением Якоби второго порядка, или даже одним уравнением первого порядка.

Решения подобных уравнения исследовались как с помощью численных расчётов [Михайлов, Модяев, 2014], так и с использованием асимптотических оценок [Михайлов и др., 2014]. Одним из основных признаков их поведения было так называемое явление перемежаемости [Зельдович и др., 1987]. Оно заключается в том, что старшие моменты решения растут быстрее младших. Это вызвано наличием редких, но при этом крайне быстро растущих решений.

При исследовании подобных уравнений большой интерес представляет так называемая корреляционная функция, показывающая взаимосвязь между значениями магнитного поля в различные моменты времени. В наиболее простом случае одного уравнения для данной функции были получены асимптотические оценки, основанные на центральной предельной теореме для мультипликативных случайных величин. Эти результаты сравнивались с результатами численного моделирования. Для более сложных уравнений был проведён численный расчёт, который качественно показал те же результаты, что и были получены в рамках оценок для одного уравнения первого порядка.

Полученные результаты могут быть развиты и на более сложные случаи, вплоть до уравнений в частных производных.

УРАВНЕНИЕ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Эволюция магнитного поля в галактиках в случае пренебрежения диффузией в плоскости диска описывается уравнением [Moss, 1995]:

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = \hat{L}\vec{B},$$

Уравнения записаны в безразмерных переменных, где время измеряется в единицах h^2/η , (h — полутолщина диска; η — коэффициент диффузии). Оператор имеет следующую матрицу:

$$L = \begin{pmatrix} -\frac{\pi^2}{4} & -R_\alpha \\ -R_\omega & -\frac{\pi^2}{4} \end{pmatrix},$$

R_α в данном случае описывает альфа-эффект; R_ω — дифференциальное вращение.

Ранее было проведено моделирование магнитного поля в случае, если коэффициент R_α меняется по случайному закону [Михайлов и др., 2014]. Показано, что в зависимости от параметров модели возможен рост или затухание поля. Продемонстрировано явление перемежаемости (когда среднеквадратичные значения растут быстрее средних). Важно исследовать не только само поле, но и корреляционную функцию.

Рассмотрим модельное уравнение Якоби, описывающее основные свойства описанного оператора:

$$y'' + \alpha(t)y = 0.$$

Если ввести вектор:

$$\vec{y} = \begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix},$$

то уравнение может быть сведено к виду:

$$\frac{d\vec{y}}{dt} = \hat{L}\vec{y},$$

где оператор имеет следующую матрицу

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\alpha(t) & 0 \end{pmatrix}.$$

Положим, что $\alpha(t)$ зависит от времени по кусочно-постоянному закону, принимая на полуинтервалах единичной длины случайные значения, равномерно распределённые по отрезку $[-1, +1]$ (рис. 1).

Вычислим корреляционную функцию, определяемую следующим образом:

$$K(t, t + \tau) = \langle y(t)y(t + \tau) \rangle.$$

Последовательность случайных чисел генерировалась с помощью генератора псевдослучайных чисел, встроенного в среду программирования Borland C++ Builder (версия 6.0). Задача решалась на отрезке $0 < t < 50$, после чего производилось усреднение по 10^5 реализациям. Корреляционная функция для различных значений τ приведена на рис. 2.

На рисунке, характеризующем корреляционную функцию, ввиду экспоненциального роста сложно выделить детали, относящиеся к поведению корреляционной функции. В связи с этим мы переходим к нормированной корреляционной функции:

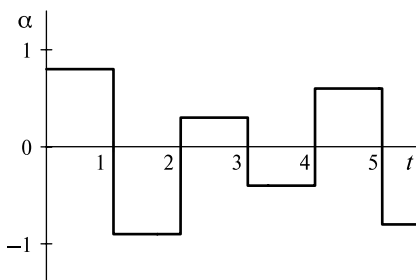


Рис. 1. График функции $\alpha(t)$

$$K_n(t, t + \tau) = \frac{\langle y(t)y(t + \tau) \rangle}{\langle y^2(t) \rangle}.$$

График нормированной корреляционной функции приведён на рис. 3. Можно заметить, что при малых t нормированная корреляционная функция приблизительно постоянна, после чего начинает совершать случайные колебания. Чтобы исследовать этот вопрос, нужно перейти к более простой задаче.

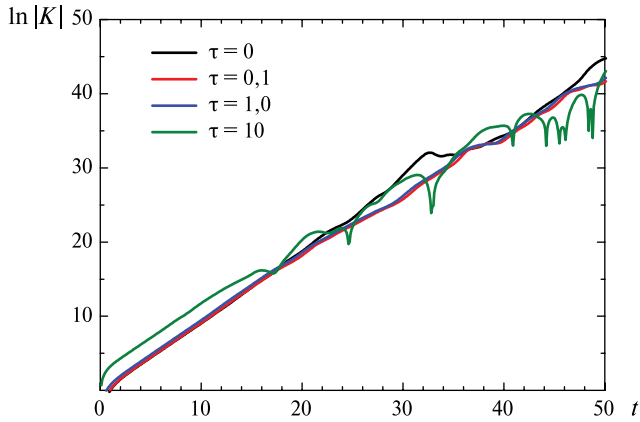


Рис. 2. Корреляционная функция для уравнения Якоби: чёрная кривая — $\tau = 0$; красная — $\tau = 0,1$; синяя — $\tau = 1,0$; зелёная — $\tau = 10$

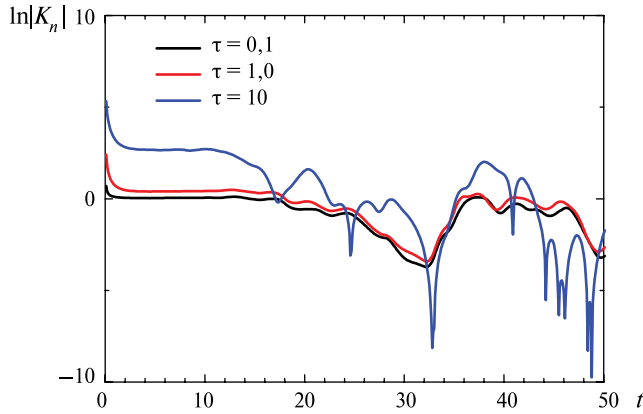


Рис. 3. Корреляционная функция для уравнения Якоби: чёрная кривая — случай $\tau = 0,1$; красная — $\tau = 1,0$; синяя — $\tau = 10$

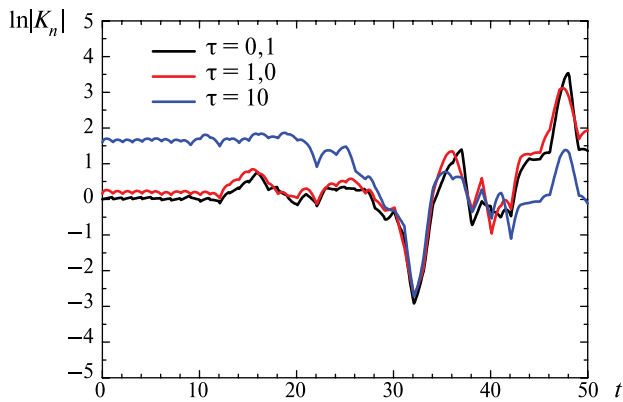


Рис. 4. Нормированная корреляционная функция для уравнения первого порядка

Рассмотрим более простое уравнение, для которого можно провести ряд оценок:

$$y' = \alpha(\tau)y.$$

Коэффициент $\alpha(t)$ вводится также как и в случае предыдущей задачи. Значение y в момент времени $t + \tau$ можно получить по формуле:

$$y(t + \tau) = y(t) \exp\left\{\sum_i \alpha_i\right\}.$$

По центральной предельной теореме сумма будет иметь нормальное распределение:

$$\sum_i \alpha_i \approx \sqrt{n} \cdot N(0, 1).$$

Вычисляя корреляционную функцию, получаем:

$$y(t)y(t + \tau) = y^2(t) \exp(N(0, 1));$$

$$K(t, t + \tau) = \langle y^2(t) \exp(N(0, 1)) \rangle.$$

Проводя процедуру усреднения, получим:

$$K(t, t + \tau) = \langle y^2(t) \rangle \exp(\tau/2).$$

Если мы нормируем корреляционную функцию, то получается

$$K_n(t, t + \tau) = \exp(\tau/2).$$

Сравним результат с численным (рис. 4). Как и предсказывает, теория, на начальной стадии корреляционная функция почти постоянна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено исследование корреляционной функции для различных уравнений, которые могут описывать рост галактического магнитного поля. Показано, что при малых временах корреляционная функция приблизительно постоянна. Результаты численного моделирования примерно совпадают с результатами асимптотического исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [Зельдович и др., 1987] Зельдович Я. Б., Молчанов С. А., Рузмайкин А. А., Соколов Д. Д. Переменяемость в случайной среде // Успехи физических наук (УФН). 1987. Т. 152. С. 3–32.
- [Михайлов и др., 2014] Михайлов Е. А., Илларионов Е. А., Модяев И. И. Скорость роста галактического магнитного поля в модели динамо со случайными коэффициентами // 11-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». 9–11 апреля 2014, ИКИ РАН, Москва: сборник трудов / Под редакцией А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 83–87.
- [Михайлов, Модяев, 2014] Михайлов Е. А., Модяев И. И. Уравнения галактического динамо со случайными коэффициентами // Вычислительные методы и программиро-

вание: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал) 2014. Т. 15. С. 351–358.

[Arshakian et al., 2009] *Arshakian T., Beck R., Krause M., Sokoloff D.* Evolution of magnetic fields in galaxies and future observational tests with the Square Kilometre Array // *Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 494. P. 21–32.

[Moss, 1995] *Moss D.* On the generation of bisymmetric magnetic field structures by tidal interactions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1995. V. 275. P. 191–194.

CORRELATION FUNCTION FOR THE EQUATION WITH RANDOM COEFFICIENTS THAT ARISE IN GALAXY MAGNETIC FIELDS MODELLING

Mikhailov E. A.¹, Grachev D. A.^{1,2}

¹ Lomonosov Moscow State University (MSU)

² Financial University under the Government of Russian Federation

Galaxy regular magnetic fields evolution is connected with the dynamo mechanism that is based on differential rotation and alpha-effect. If we study galaxies where there are such processes as supernova explosions, star formation etc., it is necessary to use galaxy dynamo equations with random coefficients. In previous works we have studied solutions of these equations, showed the intermittency (when higher momentums grow faster than lower ones). It is also important to study the correlation function that allows us connect magnetic fields for different times.

We have studied model Yacobi equation, which demonstrates main features of galaxy dynamo. The coefficient depends on time according to a piecewise constant law: for every small period of time it takes random values, after that it renews. We have obtained numerically the correlation function and its normalized modification. The solutions grow exponentially and the normalized function allows us show clearly the connection between values for different times. For small times this function is close to constant, after that it makes some oscillations and then falls to zero.

Then we have studied the correlation function for simpler stochastic differential equation of the first order. For this equation we can obtain both the numerical and the asymptotic estimates. We have shown that for small times theoretical predictions and numerical modeling give the similar results.

Keywords: magnetic fields of galaxies, dynamo theory, random coefficients.

Mikhailov Evgeny Alexandrovich — leading programmer, PhD, ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Grachev Denis Alexandrovich — research associate, associate professor

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИБРОПРОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Т. Ю. Пронин^{1,2}, А. А. Варакин¹, В. П. Крылов¹

¹ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)

² Акционерное общество (АО) «Концерн «Автоматика»

Изложен опыт итерационной разработки вибропрочной конструкции автономного модуля цифровой обработки сигналов, входящего в состав бортовой аппаратуры беспилотного космического аппарата. Наилучший результат с точки зрения сроков и качества проектирования обеспечивает комплексный подход при использовании расчётных трёхмерных моделей и результатов испытаний макетных образцов. При таком подходе выполняются процедуры проверок расчётных моделей, идентификации параметров моделей. Модели в процессе разработки трансформируются от простых, соответствующих макетам, к более сложным, соответствующим реальной конструкции. Предложены рекомендации по взаимодействию инженера-расчётчика, испытателя и разработчика вибропрочных электронных средств космических аппаратов в процессе итерационного проектирования.

Ключевые слова: электронные средства, вибропрочность, космический аппарат.

История разработки электронных средств космических аппаратов (КА) тесно связана с развитием электронной компонентной базы (ЭКБ) и обеспечением вибропрочности конструкций на этапе вывода КА на орбиту. Сегодня бортовая аппаратура КА, как правило, устанавливается на негерметичной платформе (термоплите) без виброизоляторов. Современная ЭКБ позволяет уменьшить размеры и массу блока и тем самым снизить расходы на выведение и эксплуатационные расходы на орбите [Белоус, Солодуха, 2015]. Удешевление запуска беспилотных КА достигается также за счёт использования соответствующих ракетносителей (РН), которые, однако, отличаются более высоким уровнем механических воздействий на аппаратуру КА.

Наиболее уязвимым элементом конструкции РН является головной аэродинамический обтекатель, внутри которого размещается КА. Проходящее внутрь акустическое излучение высокого уровня — 150...160 дБ — существенно влияет на бортовую аппаратуру и пилотажно-навигационные приборы. Значительный уровень акустических нагрузок, который трансформируется в широкополосную случайную вибрацию (ШСВ), и отказ от применения виброизоляторов привели к ужесточению требований механической прочности электронных средств (ЭС) КА при выводе на орбиту [Выносливость..., 1967].

Установлено, что наибольшей величины акустические нагрузки от шума реактивной струи достигают на Земле во время старта РН. Вибрации, возникающие от работы ракетных двигателей и взаимодействия обшивки с воздухом в первые минуты пуска и вывода на орбиту, наиболее негативно влияют на состояние ЭС КА. Прежде всего, это обусловлено широким диапазоном ча-

Пронин Тимофей Юрьевич — инженер, аспирант, pronin_t_y@list.ru

Варакин Алексей Александрович — доцент, кандидат технических наук, ekranus@vlsu.ru

Крылов Владимир Павлович — профессор, доктор технических наук, v_p_krylov@vlsu.ru

стот колебаний (до 2000 Гц и более) при высокой их интенсивности [Гудков, Лешаков, 1968].

Характерной тенденцией разработки вибропрочных ЭС КА, направленной на сокращение сроков и повышение качества проектирования, является использование численного (компьютерного) моделирования откликов конструкции на внешние воздействия на всех этапах проектирования и отработки [Орлов, Копытов, 2013]. Однако при этом у разработчиков ЭС КА пока сохраняется низкий уровень доверия к результатам конечно-элементного компьютерного анализа вибропрочности. Основным критерием качественной разработки остаётся прохождение готовым изделием отработочных и приёмосдаточных испытаний на соответствующий вид воздействий. Резонансные явления, обусловленные неудачными конструкторскими решениями, в процессе отработочных испытаний приводят к разрушению ЭКБ вследствие превышения допустимых нагрузок, отрыву корпусированных микросхем от печатной платы и разрушению миниатюрных выводов микросхем.

Высокая стоимость современных радиационно-стойких микропроцессоров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), применяемых в моноблоках цифровой обработки сигналов (ЦОС) АО «Концерн Автоматика», делает процесс экспериментальной отработки конструкции ЭС КА весьма затратным, иногда просто невозможным в условиях реального финансирования проекта. Выход из создавшегося положения, на наш взгляд, заключается в реализации итеративного подхода, использующего наряду с компьютерным моделированием экспериментальные исследования прототипа блока, в котором дорогостоящая ЭКБ заменена упрощёнными макетами.

На рис. 1 представлен предварительный вариант трёхмерной модели типового электронного моноблока ЦОС для беспилотного КА. 3D-модель блока разработана в CAD SolidWorks и использует упрощённые 3D-модели ЭКБ

На рис. 2а приведены полученные в системе конечно-элементного анализа ANSYS результаты моделирования реакции разработанной конструкции на воздействие ШСВ в диапазоне частот до 2000 Гц. На одной из ячеек в результате компьютерного моделирования выявлены полигоны со значениями перегрузок по уровню 3σ до 720g. Такие нагрузки являются недопустимыми для ЭКБ, выбранной разработчиком. Это обстоятельство вызвало необходимость доработки конструкции повышением жёсткости ячеек за счёт использования прижимных металлических рамок (рис. 2б).

Следует отметить, что работа в системах конечно-элементного анализа специфична, требует построения расчётных моделей, выявления граничных условий, а также включает процедуры идентификации характеристик материалов и согласования с экспериментальными данными. Поэтому параллельно с проведением расчётов был изготовлен блок с упрощёнными макетами печатных плат и ЭКБ, включая макеты ПЛИС.

Повторное моделирование модернизированной конструкции (см. рис. 2б) свидетельствует о снижении перегрузок на критичной ячейке по уровню 3σ до 138g.

Таким образом, компьютерное моделирование блока показало, что конструкция выполнена с ошибками (см. рис. 2а) и не соответствует предъявляемым требованиям к нагрузкам на ЭРИ. Аналогичные результаты показали стендовые испытания макета блока.

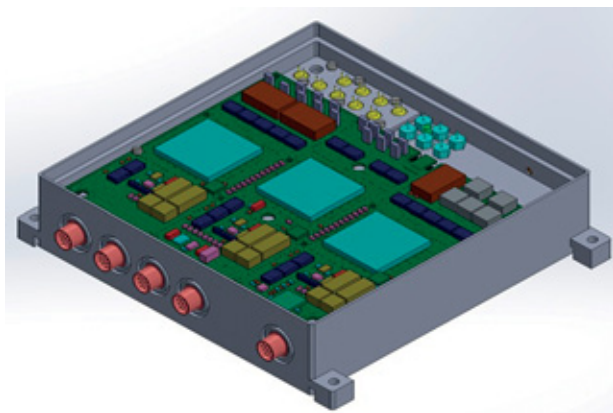


Рис. 1. Трёхмерная модель блока ЭС КА со снятой верхней крышкой

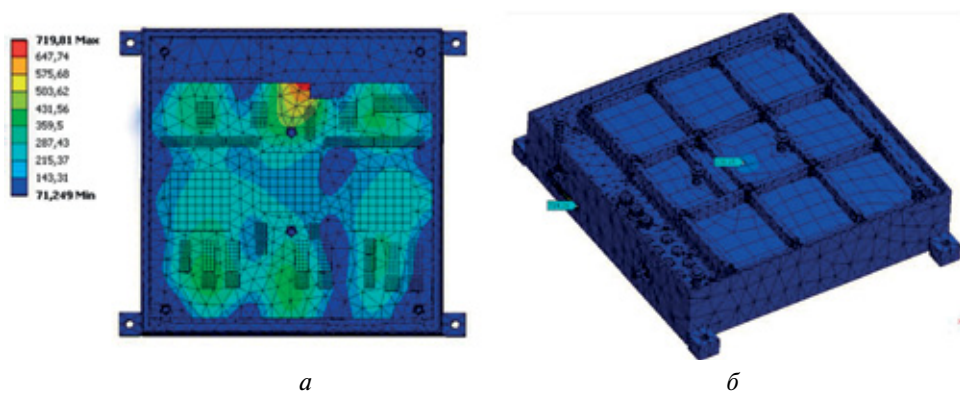


Рис. 2. Результаты математического моделирования блока ЭС КА на воздействие ШСВ: *а* — исходная конструкция; *б* — упрощённая модель конструкции с дополнительными элементами

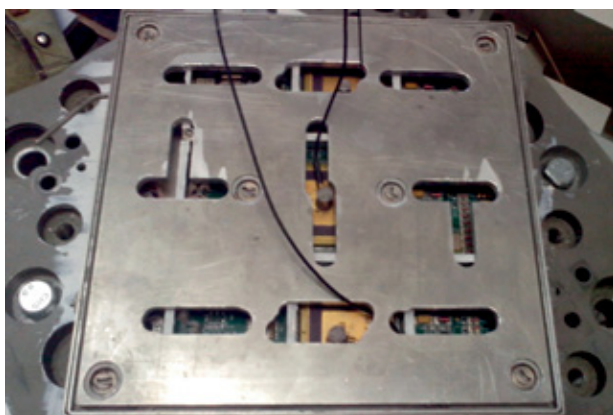


Рис. 3. Внешний вид макетного образца, установленного на вибростенд для проведения испытаний на механические воздействия

В то же время отработочные испытания макета выявили новые опасные резонансы на частотах, близких к верхней границе диапазона частот. Одной из причин ошибок конструирования, выявленной при сопоставлении результатов экспериментальных и расчётных данных, стали зазоры между элементами конструкции. С точки зрения статических нагрузок, а также колебаний на низких частотах (десятки и сотни герц) микронеровности при креплении ячеек в корпусе, креплении верхней и нижней крышек, креплении рамок не имеют решающего значения. Всё меняется, когда верхний предел вибрационной нагрузки расширяется до значений 2000 Гц и выше.

В известной формуле, приведённой ниже, можно увидеть связь виброускорения и виброперемещения для гармонической вибрации:

$$a = \frac{d^2 z}{dt^2} = -\omega^2 Z \sin(\omega t) = -\omega^2 z(t),$$

где a — виброускорение; Z — амплитуда виброперемещения; ω — частота.

Из формулы видно, что виброускорение пропорционально виброперемещению, умноженному на квадрат частоты. Это означает, что небольшие по амплитуде виброперемещения на высоких частотах должны сопровождаться большими скоростями и чрезвычайно большими амплитудами виброускорений. Аналогичным образом на высоких частотах (более 1000 Гц) интенсивные нагрузки (виброускорения), соответствующие испытательным уровням воздействий, будут сопровождаться малыми виброперемещениями.

В случае воздействия вибраций на частотах, достигающих 2000 Гц, виброперемещения элементов и составных частей блока не превышают нескольких микрометров. Не учитывать технологические зазоры, погрешности формы (неплоскостность), микронеровности в этом случае нельзя. В связи с этим, в конструкцию были введены дополнительные элементы в виде прижимных рамок ячеек, которые установили для исключения влияния больших зазоров. Для полного исключения влияния зазоров применили компаунды и эмали.

Следствием выявленной в процессе моделирования проблемы стали дополнительные технические требования по выведению плоскостности оснастки для испытаний на вибростенде. При этом плоскостность важно соблюдать не только на оснастке для проведения испытаний, но и на «привалочной» поверхности блока.

Другим результатом комплексного подхода к разработке блока на основе конечно-элементного моделирования и макетирования стали новые требования к численному моделированию. По результатам испытаний макетных образцов в конечно-элементной модели были уточнены граничные условия, введены элементы клеевых соединений, учтено влияние датчиков виброускорений.

На рис. 3 представлен макетный образец блока, изготовленный с учётом изменений, подтверждённых повторным расчётом. Через отверстия технологической крышки можно увидеть дополнительные рамки на ячейках и следы компаунда на них. Видны также датчики, которые установлены на элементах ячейки для снятия показаний и проверки правильности расчёта.

Результаты очередного компьютерного моделирования показали, что нагрузки, действующие на блок, не приведут к разрушениям и отказам в работе.

После чего были проведены механические испытания реального блока, которые подтвердили адекватность математического моделирования. Применение компьютерного моделирования на заключительной стадии итерационной разработки с использованием макетных образцов практически эквивалентно созданию и испытанию реальных изделий, что даёт основания вести речь о применении виртуальных испытаний.

Сформулированы общие рекомендации для взаимодействия инженера-расчётчика, испытателя и разработчика вибропрочных ЭС КА при проектировании подобных конструкций. В числе этих требований:

- построение расчётных моделей от простых (макеты) к сложным (готовое изделие);
- формирование частных технических заданий для расчёта на различных этапах итерационного процесса проектирования;
- выполнение процедур проверок, идентификации расчётных моделей путём проведения эксперимента на макетах;
- разработка подробной методики проведения испытаний с указанием моментов затяжки крепления элементов и технологии применения компаундов.

Результаты проведённой работы показывают, что при разработке ЭС КА с применением систем компьютерного анализа на основе конечно-элементных моделей сам процесс моделирования может быть эффективным только с учётом всестороннего анализа как расчётных, так и экспериментальных данных. При этом разработчики ЭС не могут полностью отказаться от проведения испытаний макетных образцов. Идеальная ситуация, при которой численный эксперимент является полным аналогом натурального эксперимента, возможна только при глубоком знании объекта моделирования, совершенствовании технологии сборки ЭС КА, наличии отработанной базы аналогичных изделий и идентифицированных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

- [Белоус, Солодуха, 2015] *Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.* Космическая электроника. В 2-х т. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015.
- [Выносливость..., 1967] Выносливость авиационных конструкций при акустических нагрузках / Под ред. Л. П. Лепоринской. М.: Изд-во ЦАГИ, 1967. № 218.
- [Гудков, Лешаков, 1968] *Гудков А. И., Лешаков П. С.* Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1968.
- [Орлов, Копытов, 2013] *Орлов С. А., Копытов В. И.* Нормирование и отработка бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические воздействия // Вестн. СибГАУ. 2013. Вып. № 1(47). С. 125–129.

ENSURING VIBRODIAGNOSTIC OF SPACECRAFT ELECTRONICS

T. Y. Pronin^{1,2}, A. A. Varakin¹, V. P. Krylov¹

¹ Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU)

² Joint stock company (JSC) "Concern "Avtomatika"

The experience of developing vibration of spacecraft electronics, which shows that the best results in terms of engineering time to ensure a thorough approach when using the estimated 3D models and test results of prototypes. In this approach, procedure performed audits of computational models, verified the conformity of the simulation results with experimental data, including the solution of inverse problems. The developer creates the task of the modeling process, being the "Customer" calculations. Models in the development process is converted from a simple, appropriate layouts, to more complex, corresponding to a fully finished design. Recommendations on the interaction of an analyst's, testers and developer of vibration of spacecraft electronics in the design process.

Keywords: vibration, spacecraft, electronic equipment.

Pronin Timofey Yurievich — engineer, postgraduate, pronin_t_y@list.ru

Varakin Alexey Aleksandrovich — assistant professor, ekranus@vlsu.ru

Krylov Vladimir Pavlovich — professor, doctor of technical sciences, v_p_krylov@vlsu.ru

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЯДА АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЁЙ

А. А. Резаева¹, М. П. Щербина^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ)

² Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ)

Астероиды, сближающиеся с Землёй (АСЗ), рассматриваются и как потенциально опасные объекты, и как возможные источники внеземных ресурсов. Поэтому задача определения их характеристик на химико-минеральном уровне особенно актуальна и востребована.

Используя наблюдательные данные четырёх астероидов (9950 ESA (1990 VB), 24445 (2000 PM), 329437 (2002 OA22), 4450 Pan (1987 SY)), полученные в 2013–2014 гг. С. И. Барабановым и другими сотрудниками Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) на Терскольской обсерватории в диапазоне 0,35...0,7 мкм, была проведена обработка и моделирование спектров отражения.

Для каждого из рассматриваемых астероидов была выполнена качественная (с использованием спектральной классификации Д. Толена) и количественная интерпретация (с использованием программы, разработанной для этих целей на базе языка программирования MatLab) химико-минерального состава, оценено относительное содержание в веществе 4–6 основных минералов и определён спектральный класс.

Ключевые слова: астероиды, АСЗ, спектральная классификация, химико-минеральный состав, спектр отражения.

ВВЕДЕНИЕ

Астероиды — это малые планеты преимущественно каменистого состава, сосредоточенные в Солнечной системе в основном в Главном поясе астероидов, находящемся между орбитами Марса и Юпитера [Сафронов, 1969]. Те из них, которые имеют большие полуоси орбит меньшие или равные 1,3 а. е., получили название астероидов, сближающихся с Землёй (АСЗ). Изучение этих астероидов представляет высокий практический интерес: среди них есть такие, которые могут столкнуться с Землёй, и поэтому представляют опасность; в то же время некоторые из них могут быть наиболее доступными источниками внеземных природных ресурсов [Lewis, 1998]. Кроме того, на основе знания химико-минерального состава астероидов и их распределения в пространстве можно оценивать реалистичность моделей образования Солнечной системы.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В данной работе был проведён качественный и количественный анализ спектров отражения АСЗ, в том числе потенциально опасных (т. е. сближающихся с орбитой Земли на расстояния, меньшие или равные 0,05 а. е.). А именно, были изучены астероиды: 9950 ESA (1990 VB), 24445 (2000 PM), 329437

Резаева Арина Александровна — студентка, aa.rezaeva@physics.msu.ru

Щербина Марина Петровна — аспирантка, ведущий инженер

(2002 OA22), 4450 Pan (1987 SY). Наблюдательные данные были получены С.И. Барабановым и другими сотрудниками ИНАСАН в 2013–2014 гг. на обсерватории Терскол с использованием телескопа Цейс-2000 с ПЗС-камерой FLI PL4301E (поле $11 \times 11'$). Спектры были получены в диапазоне 0,35...0,7 мкм. Сведения о количестве наблюдательных ночей, количестве полученных спектров для каждого из астероидов и используемых стандартных звёздах приведены в табл. 1.

Таблица 1. Количество наблюдательных ночей, количество полученных спектров для каждого из изученных астероидов и стандартные звёзды

Астероид	Количество наблюдательных ночей	Количество спектров	Используемые стандартные звёзды
9950 ESA(1990 VB)	2	5	HIP115604
24445 (2000 PM)	2	7	HIP115604
329437 (2002 OA22)	3	9	HIP109931, HIP115604
4450 Pan (1987 SY)	3	7	HIP109931

Вначале была проведена первичная обработка полученных наблюдательных данных астероидов с помощью программы DECH [Галазутдинов, 1991] (применялись такие стандартные процедуры как коррекция плоского поля, учёт фона неба и т.д.). Калибровка длин волн спектров была выполнена по бальмеровской серии водорода спектра звезды α Peg. Расчёт спектров отражения астероидов осуществлялся с использованием спектров наблюдавшихся вместе с астероидами стандартных звёзд (с учётом функции спектральной прозрачности атмосферы и разности воздушных масс) [Бусарев, 1999], являющихся аналогами Солнца [Hardorp, 1980; <http://simbad.cfa.harvard.edu/simbad>, дата обращения: 08.02.2016 г.]. Полученные спектры отражения были нормированы на значение на длине волны 0,55 мкм. Затем проводились частотная фильтрация спектров и их полиномиальная аппроксимация с помощью программного пакета ORIGIN. В качестве итоговых спектров отражения астероидов были взяты усреднённые спектры или единичные с лучшим отношением сигнал/шум (если усреднение было невозможно из-за малого количества данных). Имея в распоряжении нормированные сглаженные спектры отражения астероидов, можно качественно судить об отношении их к тому или иному таксономическому классу и, соответственно, — об их минералогии.

Качественная интерпретация спектров отражения астероидов проводилась с использованием спектральной классификации Д. Толена. Она была предложена в 1984 г. на основании аппроксимации спектров отражения астероидов по данным их узкополосной многоцветной фотометрии и измерений геометрического альбедо [Tholen, 1984; Tholen, Varucci, 1989] (рис. 1). С помощью кластерного анализа было выделено три крупных таксономических класса и ряд более мелких:

- 1) С-астероиды: их аналогами являются гидратированные минералы и окислы, а также метеориты углистые хондриты; отличаются низким геометрическим альбедо; в этот класс входит ~75 % известных астероидов;

- 2) S-астероиды: их аналогами являются высокотемпературные силикатные минералы, а также метеориты обыкновенные хондриты; отличаются высоким геометрическим альбедо; в этот класс входит ~17 % известных астероидов;
- 3) X-астероиды (обладающие некоторой неопределённостью таксономического типа): имеют похожие по форме спектры отражения, но разные значения геометрического альбедо и, поэтому, включают такие разные по составу объекты как M-астероиды (их аналогами являются Fe-Ni-соединения, высокотемпературные силикатные минералы, железные и железо-каменные метеориты), E-астероиды (их аналогами являются низкожелезистые пироксены и метеориты ахондриты), P-астероиды (их аналоги: гидратированные минералы и окислы, некоторые типы углистых хондритов).

На рис. 1 представлен общий вид спектров, характерных для каждого из вышеперечисленных классов. Здесь классы D, T, B, C, F и G близки к C-типу, A, S, Q, R и V — к S-типу, а классы E, M, P условно отнесены к X-типу.

Для количественного анализа спектров отражения астероидов была разработана программа на базе языка программирования MatLab, позволяющая выполнять моделирование минерального состава твёрдого раздробленного вещества по его спектру отражения путём комбинирования спектральных данных всех известных минералов. Для этого нами была использована наиболее разработанная база спектральных данных о минералах RELAB Браунского университета (США) (<http://www.planetary.brown.edu/relab/>, дата обращения 08.02.2016 г.). Эта программа работает по следующему алгоритму.

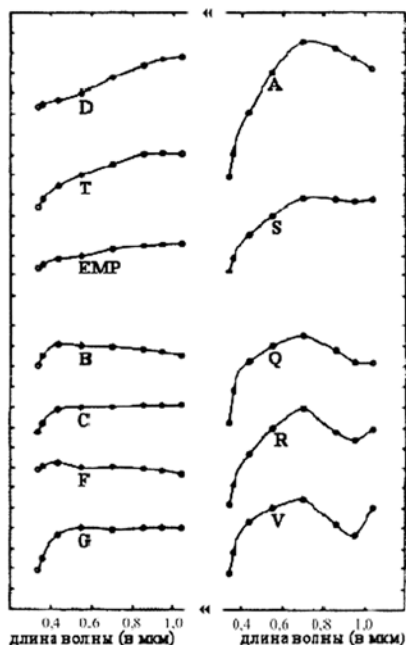


Рис 1. Спектральные классы астероидов (по Д. Толену)

1. В программу загружается полученный нормированный и сглаженный спектр отражения астероида.
2. Задаётся набор опорных длин волн (в которых осуществляется сравнение спектров отражения астероида и каждого минерала), исходя из особенностей рассматриваемого спектра.
3. Программа подбирает из базы данных такие 20 минералов, что их спектры отражения в каждой из выбранных опорных точках менее остальных отличаются от исследуемого спектра отражения астероида. В результате этой операции получается несколько наборов (по количеству опорных точек) по 20 минералов в каждом.
4. Программа отбирает из выделенных наборов только те минералы, которые совпадают во всех наборах. В итоге остаётся несколько модельных минералов.

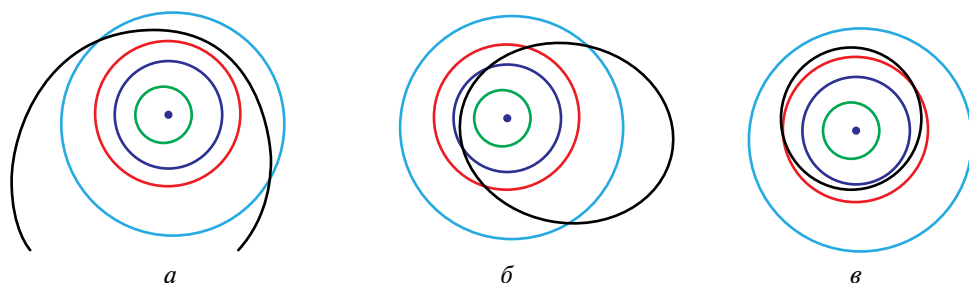


Рис 2. Приблизительная орбита астероидов Амура 1221 (а), Аполлона 1862 (б) и Атона 2062 (в). Орбита Земли обозначена красным цветом, Марса — бирюзовым, астероида — чёрным

5. Спектры оставшихся минералов суммируются с весами такими, что их суммарный спектр минимально отличается от спектра отражения исследуемого астероида.
6. Программа выводит на одном графике спектр отражения астероида и его «модельное» приближение (согласно п. 5), а также список использованных минералов, их весовые (или долевые) коэффициенты и среднюю ошибку приближения.

Таким образом, полученный в итоге работы программы список минералов с их долевыми коэффициентами количественно характеризует основной минеральный состав астероида.

Перейдём к результатам, полученным для каждого из астероидов. Используемая далее терминология:

- Амурец — околоземный астероид, орбита которого не заходит внутрь орбиты Земли;
- Аполлонец — околоземный астероид, орбита которого иногда заходит внутрь орбиты Земли;
- Атонец — околоземный астероид, большую часть времени находящийся внутри орбиты Земли, только в окрестности афелиев выходит за её пределы.

Наглядно орбиты данных астероидов представлены на рис. 2.

Общие сведения об астероидах, рассматриваемых в данной работе, были взяты из баз Центра малых планет международного астрономического союза (<http://www.minorplanetcenter.net/>, дата обращения: 08.02.2016 г.) и каталога АСЗ ИПА РАН (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЁЙ

2.1. Астероид 9950

Астероид 9950, Амурец. Общая информация об этом астероиде представлена в табл. 2.

Таблица 2. Общие сведения об астероиде 9950

Период обращения, дни	Диаметр (км)	Период вращения, ч	Диапазон изменения светового фазового угла (в скобках приведена дата наблюдения)	Количество наблюдательных ночей	Количество полученных спектров	Другие особенности
1393,23	2,47	6,71	60,2° (08.09.2013)–59,7° (12.09.2013)	2	4	Геометрическое альbedo 0,1

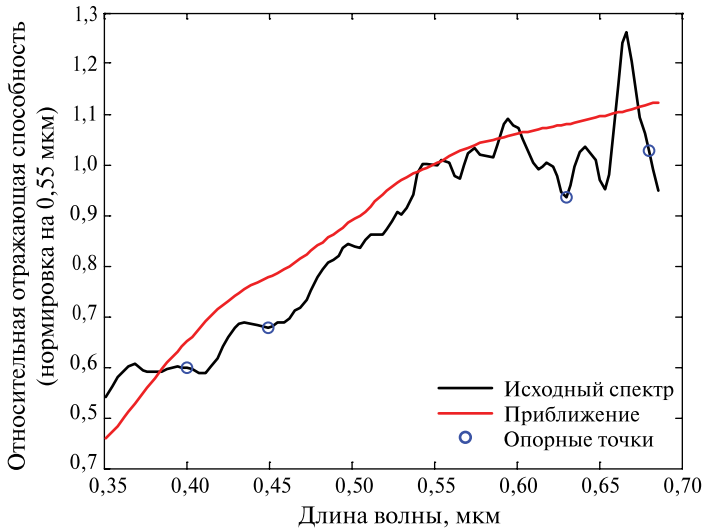


Рис. 3. Первая сторона астероида 9950. Чёрным цветом изображён спектр отражения астероида, красным — модельное приближение

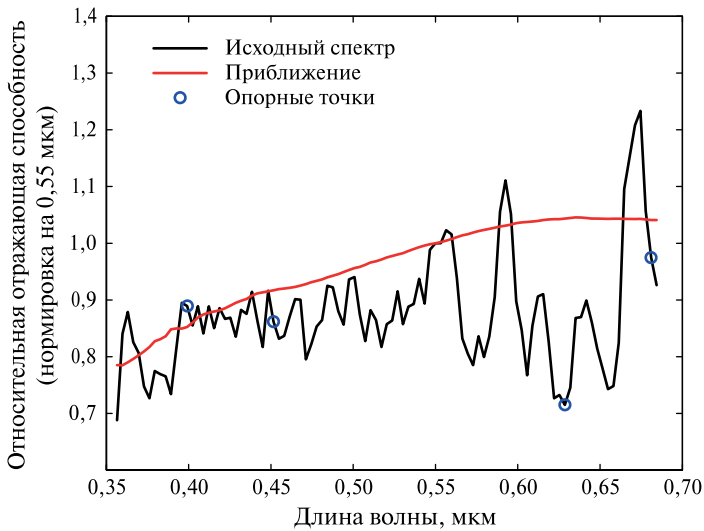


Рис. 4. Вторая сторона астероида 9950. Чёрным цветом изображён спектр отражения, красным — модельное приближение

Таблица 3. Результаты для астероида 9950

Тип	Спектральный класс	Минералы согласно классу	Полосы поглощения (центральная длина волны и диапазон), мкм	Минералы согласно аппроксимации	Содержание, в долях	Погрешность, %
Амурец	<i>Сторона 1:</i> A-S	Оливин (железо-магний-силикат (MgFe) ₂ [SiO ₄]) Пироксен	0,42; 0,38...0,43 (Fe ³⁺); 0,63; 0,58...0,67 (окисленные соединения)	Авгит (клино-пироксен) Пироксен Оливин (Mg,Fe) ₂ (SiO ₄) BULK	0,38 0,21 0,21 0,2	5
	<i>Сторона 2:</i> G	Гидросиликаты	0,37; 0,36...0,40; 0,634 0,58...0,67 (окисленные соединения)	BULK Авгит (клино-пироксен)	0,68 0,32	9

Были получены спектры двух противоположных сторон астероида. На рис. 3 и 4 приведены спектры отражения каждой из сторон астероида и приближения, полученные программой. В табл. 3 собраны результаты изучения астероида 9950. Первая сторона была отнесена к классам A-S. На ней было подтверждено наличие минералов, характерных для указанных классов A-S (сторона 1, рис. 3), для противоположной (второй) стороны такого подтверждения получено не было (сторона 2, рис. 4) Также по результатам работы программы можно оценить содержание на данном астероиде некоторых дополнительных минералов, а именно: (на первой стороне) авгита; (на второй стороне) авгита и BULK (макрочастиц неизвестного состава).

2.2. Астероид 24445

Астероид 24445, Аполлонец. Общая информация об этом астероиде представлена в табл. 4.

Таблица 4. Общая информация об астероиде 24445

Период обращения, дни	Диаметр, км	Период вращения, ч	Диапазон изменения светового фазового угла (в скобках приведена соответствующая дата наблюдения)	Количество наблюдательных ночей	Количество полученных спектров	Другие особенности
1200,28	4	6,76	53,3° (08.09.2013)– 54,3° (10.09.2013)	2	7	–

Были получены спектры двух противоположных сторон астероида. На рис. 5 и 6 приведены спектры отражения каждой из сторон астероида и их приближения, полученные программой. В табл. 5 собраны результаты изучения астероида 24445. Обе стороны астероида были отнесены к диапазону классов A-S. На двух сторонах подтверждено наличие пироксена, а на первой — оливина. По результатам работы программы можно также оценить содержание

в веществе астероида некоторых дополнительных минералов, а именно: на первой стороне актинолита, плагиоклазов, стекла, BULK (макрочастицы неизвестного состава), и на второй стороне плагиоклазов, олигоклаза, авгита, стекла, BULK (макрочастиц неизвестного состава).

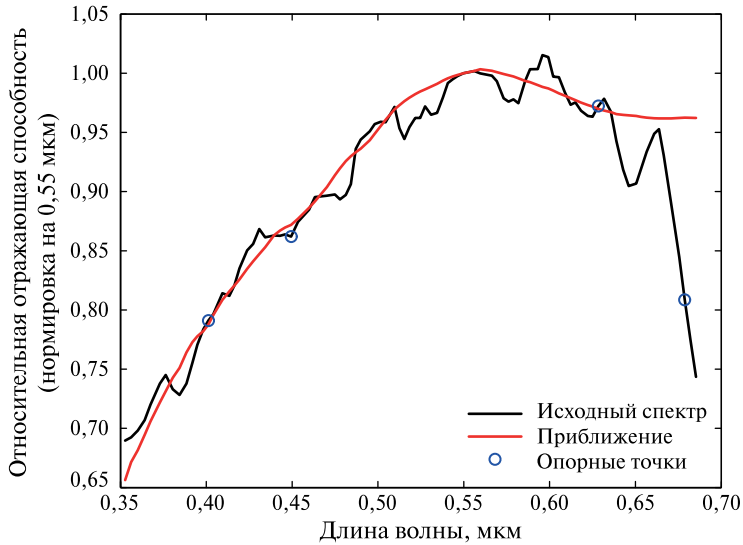


Рис. 5. Первая сторона астероида 24445. Чёрным цветом изображён спектр отражения, красным — модельное приближение

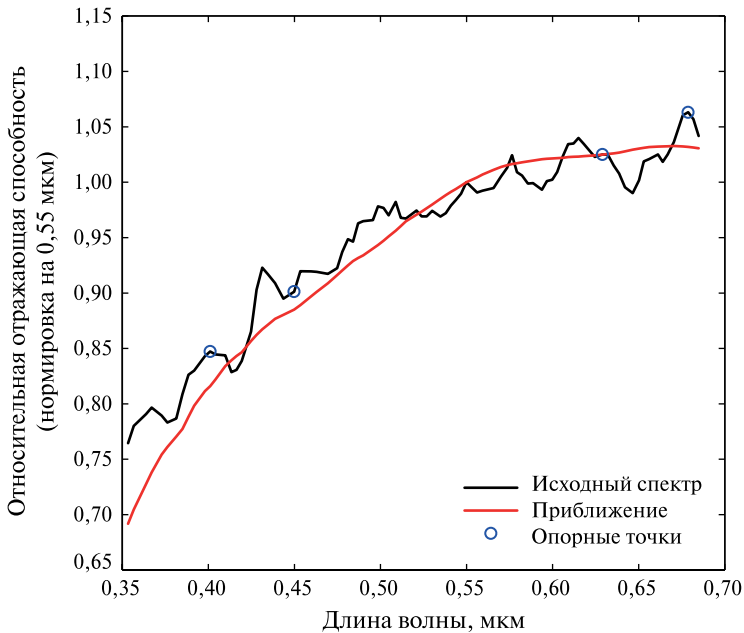


Рис. 6. Вторая сторона астероида 24445. Чёрным цветом изображён спектр отражения, красным — модельное приближение

Таблица 5. Результаты для астероида 24445

Тип	Спектральный класс	Минералы согласно классу	Полосы поглощения (центральная длина волны и диапазон), мкм	Минералы согласно аппроксимации	Содержание, в долях	Погрешность, %
Аполлонец ПОА	A-S	Оливин Пироксен	0,64; 0,62...0,66 (окисленные соединения); признаки пироксен-оливиновой полосы поглощения у 1,0 мкм	<i>Сторона 1</i>		10
				Оливин (Mg, Fe) ₂ (SiO ₄)	0,33	
				Актинолит (силикат)	0,15	
				Пироксен	0,15	
				Плагиоклазы (высокотемпературные соединения (Na, Ca)AlSi ₃ O ₈), полевой шпат)	0,14	
				Стекло, аналог стекла лунного реголита	0,14	
				BULK	0,11	
				<i>Сторона 2</i>		1
				Пироксен	0,15	
				Плагиоклазы (высокотемпературные соединения (Na, Ca)AlSi ₃ O ₈), полевой шпат	0,14	
				Олигоклаз (полевой шпат NaAlSi ₃ O ₈ –CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	0,14	
				Авгит (клинопироксен)	0,14	
				Стекло, аналог стекла лунного реголита	0,14	
				BULK	0,14	

2.3. Астероид 329437

Астероид 329437, Атонец. Общая информация об этом астероиде представлена в табл. 6.

Таблица 6. Общие сведения об астероиде 329437

Период обращения, дни	Диаметр, км	Период вращения, ч	Диапазон изменения светового фазового угла (в скобках приведена дата наблюдения)	Количество наблюдательных ночей	Количество полученных спектров	Другие особенности
330,71	0,4	2,61	38,0° (10.09.2013)– 36,5° (12.09.2013)	3	9	–

Были получены спектры двух противоположных сторон астероида. На рис. 7 и 8 приведены спектры отражения каждой из сторон астероида и их модельных приближений, полученных программой. В табл. 7 собраны результаты изучения астероида 329437. Обе стороны астероида могут быть отнесены

к классу S. В то же время на спектрах отражения астероида имеется нехарактерная для высокотемпературных минералов полоса поглощения окисленных соединений с центром у 0,63 мкм [Hiroi et al., 1996]. По результатам работы программы можно оценить содержание на данном астероиде и некоторых дополнительных минералов, а именно: на первой стороне — стекла; на второй стороне — актинолита, BULK (макрочастицы неизвестного состава) и стекла.

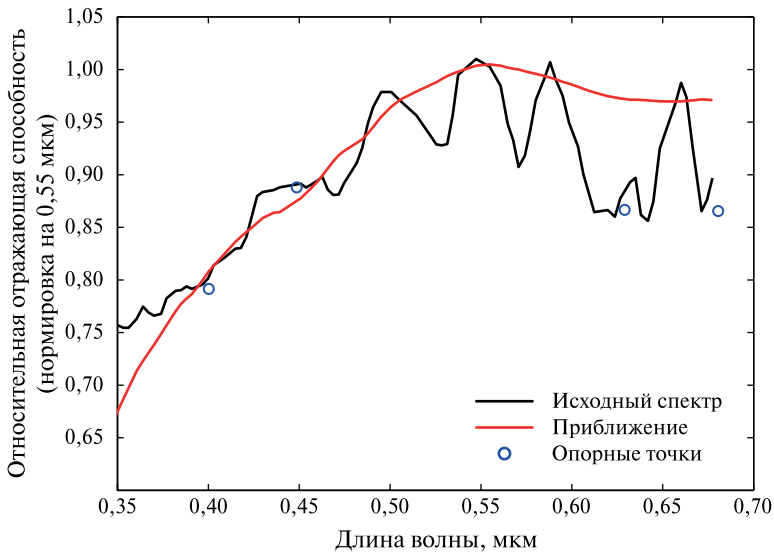


Рис. 7. Первая сторона астероида 329437. Чёрным цветом изображён спектр отражения, красным — модельное приближение

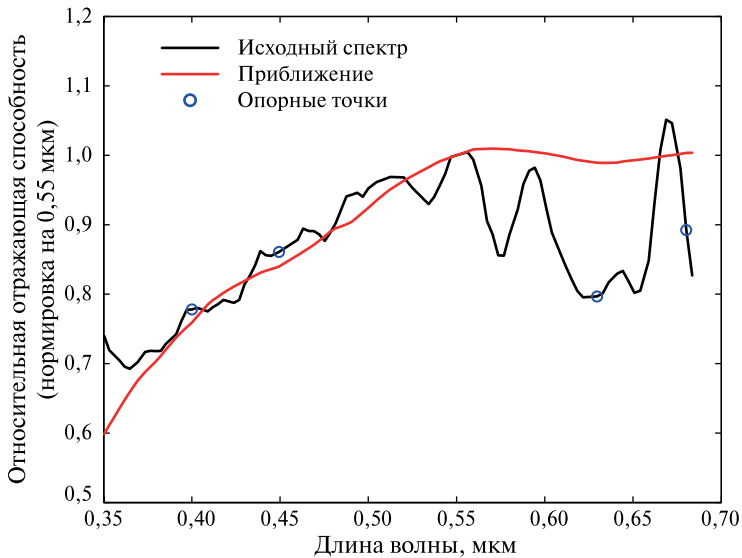


Рис. 8. Вторая сторона астероида 329437. Чёрным цветом изображён спектр отражения, красным — модельное приближение

Таблица 7. Результаты для астероида 329437

Тип	Спектральный класс	Минералы согласно классу	Полосы поглощения (центральная длина волны и диапазон), мкм	Минералы согласно аппроксимации	Содержание, в долях	Погрешность, %
Атонец	<i>Сторона 1:</i> S	<i>Сторона 1</i> Оливин Пироксен	0,63; 0,55...0,67 (окисленные соединения); признаки пироксен-оливиновой полосы поглощения у 1,0 мкм	<i>Сторона 1</i>		
				Оливин (Mg,Fe) ₂ (SiO ₄)	0,21	6
			Клинохлор (филосиликат Mg и Al с гидроксиллом)	0,21		
			Пироксен	0,2		
			BULK	0,2		
			Стекло, аналог стекла лунного реголита	0,19		
	<i>Сторона 2:</i> S	<i>Сторона 2</i> Оливин Пироксен		<i>Сторона 2</i>		
			Оливин (Mg,Fe) ₂ (SiO ₄)	0,3	8	
			Актинолит (Quebec)	0,14		
			Пироксен	0,14		
			BULK	0,14		
			Актинолит (силикаты	0,14		
			Ca ₂ (Mg,Fe) ₃ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂			
			Стекло, аналог лунного реголита	0,13		

2.4. Астероид 4450 Pan

Астероид 4450 (Pan), Аполлонец. Общая информация об этом астероиде представлена в табл. 8.

Таблица 8. Общие сведения об астероиде 4450

Период обращения (дни)	Диаметр (км)	Период вращения (часы)	Диапазон изменения светового угла (в скобках дата наблюдения)	Количество наблюдательных ночей	Количество полученных спектров	Другие особенности
632,64	1	56,48	37,3 (10.09.2013)– 32,5 (13.09.2013)	3	7	Контактный двойной

На рис. 9 и 10 приведены спектры отражения астероида и приближения, полученного программой. В табл. 9 собраны результаты изучения астероида 4450. Обе стороны астероида были отнесены к классу Q-R. Моделированием было подтверждено наличие обеих сторонах пироксена, на первой — оливина.

По результатам работы программы можно оценить содержание на данном астероиде некоторых дополнительных минералов, а именно: (на первой стороне) BULK(макрочастицы неизвестного состава), форстерита, авгита, актинолита; (на второй стороне) плагиоклазов.

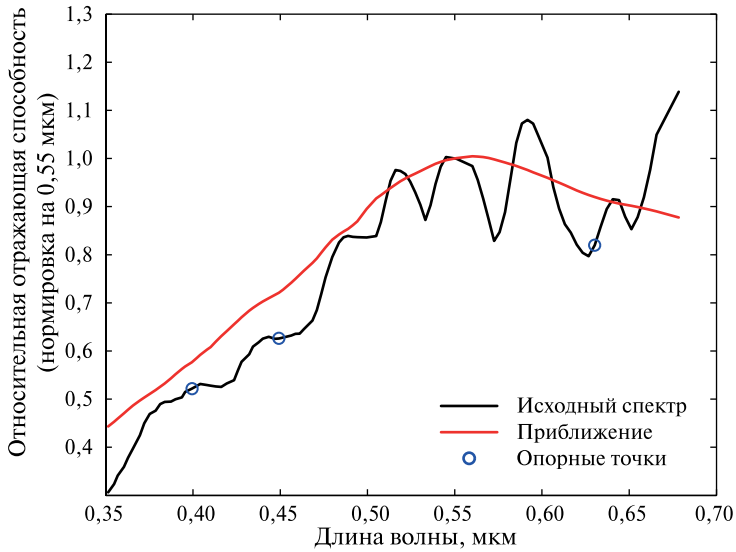


Рис. 9. Первая сторона астероида 4450. Чёрным цветом изображён спектр отражения, красным — модельное приближение

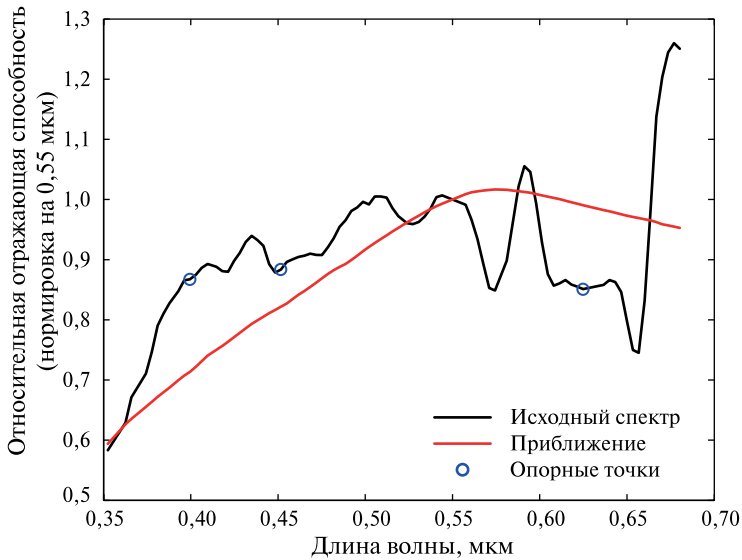


Рис. 10. Вторая сторона астероида 4450. Чёрным цветом изображён спектр отражения, красным — модельное приближение

Таблица 9. Результаты для астероида 4450

Тип	Спектральный класс	Минералы согласно классу	Полосы поглощения (центральная длина волны и диапазон), мкм	Минералы согласно аппроксимации	Содержание, в долях	Погрешность, %
Аполлонец ПОА	Q-R	Q	0,44; 0,43...0,46 (Fe ³⁺); 0,63; 0,6...0,65 (окисленные соединения)	<i>Сторона 1</i>		4
		Оливин Пироксен Металл		BULK	0,18	
		R		Форстерит (силикат магния из группы оливина)	0,13	
		Оливин Пироксен		Авгит (клинопироксены)	0,12	
				Пироксен	0,12	
				Актинолит	0,12	
				Диоксид (силикат из пироксенов)		
				Оливин		
				Стекло, аналог стекла лунного реголита		
				<i>Сторона 2</i>		10
				Пироксен	0,69	
				Плагиоклазы (высокотемпературные соединения (Na,Ca) AlSi ₂ O ₂), полевой шпат)	0,31	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были получены качественная и количественная интерпретация спектров группы астероидов, сближающихся с Землёй (9950 ESA(1990 VB), 24445 (2000 PM), 329437 (2002 OA22), 4450 Pan (1987 SY); из них потенциально опасные: 24445, 4450). В большинстве случаев наличие минералов, предсказанных качественно, подтвердилось при количественной обработке спектров. При количественной обработке были найдены дополнительные минералы, которые могут входить в состав астероидов. Следует отметить, что на нескольких спектрах отражения рассматриваемых АСЗ видна полоса поглощения с центром 0,63...0,65 мкм, которая отсутствует в спектрах отражения высокотемпературных минералов (оливина, пироксена, плагиоклаза и др.), используемых нами для моделирования. Как было показано при изучении астероидов S-типа, указанная полоса поглощения может возникать в окислах металлов и других окисленных соединений, имеющих в поверхностном веществе астероидов [Hiroi et al., 1996].

В дальнейших работах планируется увеличивать число исследованных подобным образом астероидов и провести уточнение используемых моделей.

ЛИТЕРАТУРА

- [Бусарев, 1999] *Бусарев В. В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. № 2. С. 140–150.
- [Галазутдинов, 1991] *Галазутдинов Г. А.* Обработка астрономических спектров в ОС Windows с помощью программ DECH. Ч. 2. Обработка спектров (описание программы Dech20T и руководство пользователя: Препринт САО РАН. 1991.
- [Сафронов, 1969] *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- [Hardorp, 1980] *Hardorp J.* The Sun among the stars // *Astron. Astroph.* 1980. V. 91. P. 221–232.
- [Hiroi et al., 1996] *Hiroi T., Vilas F., Sunshine J. M.* Discovery and analysis of minor absorption bands in S-asteroid visible reflectance spectra // *Icarus.* 1996. V. 119. P. 202–208.
- [Lewis, 1998] *Lewis J. S.* Mining the Sky: Untold Riches from the Asteroids, Comets, and Planets. 1998.
- [Tholen, 1984] *Tholen D. J.* Asteroid taxonomy: From cluster analysis to photometry: PhD Thesis. University of Arizona, 1984. 150 p.
- [Tholen, Barucci, 1989] *Tholen D. J., Barucci M. A.* Asteroid taxonomy // *Asteroids II* / Eds. Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 298–315.

SPECTROPHOTOMETRIC ANALYSIS OF A NUMBER OF NEAR-EARTH ASTEROIDS (NEAS)

A. A. Rezaeva¹, M. P. Scherbina^{1,2}

¹ Lomonosov Moscow State University (MSU)

² Sternberg Astronomical Institute (SAI)

Near-Earth asteroids (NEAs) are considered as potentially dangerous objects and possible sources of extraterrestrial resources. So a task of determination of their chemical and mineral properties is especially actual and asked-for. Using observed data of four asteroids (9950 ESA (1990 VB), 24445 (2000 PM), 329437 (2002 OA22), 4450 Pan (1987 SY)) that were obtained in 2013–2014 years by S. I. Barabanov and other workers of Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (INASAN) at the Terskol Observatory over the range 0,35 to 0,7 micrometers, a processing and modeling of reflectance spectra were made.

Also qualitative (with the use of D. Tholen's spectral classification) and quantitative interpretations (with the use of a specially made program based on programming language MatLab) of chemical and mineral composition were made for each of concerned objects, relative contents of 4–6 main minerals in substance of the objects were estimated and spectral types were determined.

Keywords: asteroids, NEAs, spectral classification, chemical and mineral composition, reflectance spectra.

Rezaeva Arina Alexandrovna — student

Scherbina Marina Petrovna — postgraduate student, leading engineer

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Л. В. Савкин

Публичное акционерное общество (ПАО) «Радиофизика»

В работе исследуются проблемы графоаналитического моделирования ранее предложенных бортовых регенеративных электронных систем космических аппаратов. В первой части работы дан краткий обзор графоаналитических методов моделирования реконфигурируемых вычислительных архитектур, подходящих к моделированию регенеративных электронных систем. Во второй части рассмотрены проблемные вопросы комбинаторных ограничений и оптимизации графоаналитических моделей регенеративных электронных систем, сформулирована проблема количественной оптимизации функциональных вершин графов. В третьей части рассмотрены основные способы регенерации фрагментов реконфигурируемого вычислительного поля с позиций введённых в настоящей работе понятий целевого и избыточного конфигурационных графов.

Ключевые слова: реконфигурируемое вычислительное поле, графоаналитическая модель, фрагмент, оргграф, избыточность, целевой граф, избыточный граф.

ВВЕДЕНИЕ

Различные концепции реконфигурируемых вычислительных систем (РВС), реализуемые в большинстве известных случаев на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) класса FPGA (Field Programmable Gate Array) [Каляев и др., 2009; Nauck, 2007; Grout, 2008], позволяют сегодня исследовать качественно новые подходы в построении отказоустойчивой бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических систем и комплексов. Одним из таких подходов является практическая реализация *регенеративных электронных систем* (РегЭС) [Савкин, 2015а], способных восстанавливать образующие её дискретные элементы на низком аппаратном уровне, т.е. уровне конфигурируемых логических блоков (КЛБ) [Уваров, 2007]. Локальное восстановление аппаратных архитектур РегЭС достигается за счёт *низкоуровневой избыточности* и *динамической реконфигурации* единого реконфигурируемого вычислительного поля (РВП), строящегося на базе интегрированной и однородной аппаратно-программной платформы, состоящей из нескольких ПЛИС FPGA. Данный большой класс электронных систем предлагается относить к *целеустремлённым отказоустойчивым системам* [Акофф, Эмери, 1974], характеризующимся способностью адаптировать собственную аппаратную архитектуру не только к информационной структуре решаемых задач [Каляев и др., 2009], но и к неисправностям и отказам, которые могут возникать в течение всего срока эксплуатации РегЭС. Более подробное обоснование причины отнесения РегЭС к классу целеустремлённых систем будет представлено в основной части данной работы.

Использование бортовых РегЭС в космических аппаратах (КА) позволит наиболее рационально использовать общий аппаратный ресурс служебных и целевых систем, что является особенно важным в виду наблюдаемой сегодня тенденции к интеграции [Грущанский, Дергачев, 2008; Давыдов, Репин, 1996] многих бортовых систем цифровой обработки данных в единые аппаратно-

программные комплексы и модули. Вместе с тем необходимо отметить, что сама концепция РегЭС представляет собой совокупность таких подходов по аппаратно-программной реализации бортовых систем КА, которые в значительной степени отличаются от традиционных подходов с применением микропроцессорных архитектур. Речь, в частности, идёт об использовании преимущественно однородных реконфигурируемых аппаратных архитектур, возможности практического применения которых предоставляют сегодня активно развивающиеся технологии ПЛИС.

Пожалуй, самую важную роль в формировании идеи РегЭС играют два обстоятельства, связанные с конкретными характеристиками ПЛИС, благодаря которым сегодня можно говорить о реализации подобного класса систем вообще.

Первым обстоятельством является *возможность парирования отказов в ПЛИС на уровне одного конфигурируемого логического блока* (КЛБ). Этим свойством обладают практически все известные на сегодняшний день радиационноустойчивые ПЛИС FPGA, причём данная характеристика в большинстве случаев достигается преимущественно технологическим путём.

Второе обстоятельство предполагает использование в РегЭС ПЛИС FPGA с возможностями *динамической реконфигурации архитектуры*, которым в последнее время посвящено немало интересных работ зарубежных исследователей. Безусловно, важную роль в построении РегЭС играют также и способы организации конфигурационной памяти, позволяющие реализовать режимы локальной либо полной реконфигурации архитектуры ПЛИС, и сам тип архитектуры ПЛИС (островная, иерархическая, асимметричная, комбинированная и др.), от которого зависят все её конфигурационные свойства, и многие другие параметры. Однако именно вышеотмеченные два обстоятельства служат отправной точкой, позволяющей говорить о практической реализации концепции РегЭС в целом.

В настоящей работе предлагается рассмотреть ключевые проблемы, связанные с вопросами структурного и функционального проектирования (моделирования) РегЭС.

ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Ввиду значительной степени однородности аппаратных архитектур РегЭС, наиболее удобным способом изучения (по крайней мере, на первом этапе проектирования) их структурных и функциональных особенностей является *графоаналитическое моделирование*, причём преимущественно двумерное (планарное). Все графоаналитические модели РегЭС предполагают использование двух фундаментальных принципов структурно-функциональной организации архитектур вычислительных систем — *конвейерности* и *параллелизма*. Данные принципы составляют основу анализа, синтеза и оптимизации аппаратно-программных составляющих абсолютно всех известных на сегодняшний день вычислительных систем, включая однородные, систолические, кластерные, реконфигурируемые, мультikonвейерные, мультиклеточные и многие другие [Алексеев и др., 2005; Богданов и др., 2004; Каляев и др., 2009; Хорошевский, 2008; Шалыто, 2000]. Нередко в кругу специалистов по вычислительным си-

стемам, можно услышать фразу о том, что все из упомянутых выше типов вычислительных систем являются «названием разных сторон одного и того же». Данное выражение в какой-то степени является грубым подтверждением особой важности и универсальности принципов конвейерности и параллелизма, поскольку при более глубоком рассмотрении всех деталей, связанных с различиями между вышеназванными типами вычислительных систем, естественным образом происходит осознание и понимание того, что все пути сводятся именно к этим двум фундаментальным принципам.

Упомянутые выше принципы и ещё ряд других играют важнейшую роль в построении графоаналитических моделей РВС, к которым относятся и все типы РегЭС, рассмотренные в ранних работах [Савкин, 2015а, б; 2016].

Цель работы — исследование принципов аппаратно-программного построения и функционирования РегЭС на основе графоаналитических методов.

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие *основные задачи*:

- 1) анализ известных на сегодняшний день методов графоаналитического моделирования комбинационных схем, составляющих основу всех типов архитектур вычислительных систем, оперирующих в функциональном базисе булевых функций;
- 2) выбор наиболее подходящих подходов по анализу, синтезу и оптимизации архитектур вычислительных систем в рамках различных типов РегЭС;
- 3) рассмотрение ключевых проблемных вопросов, связанных с комбинаторными и топологическими ограничениями фрагментов РВП РегЭС, возникающими в режиме локальной и полной реконфигурации единого РВП;
- 4) оценка практических возможностей по оптимизации РегЭС с точки зрения повышения надёжности их функционирования в составе бортовых систем космических аппаратов;
- 5) исследование базовых принципов функционирования РегЭС на основе их комбинированных графоаналитических моделей.

В работе предлагается рассмотреть результаты общего графоаналитического моделирования РегЭС, которые можно будет использовать в разработке методов аппаратного синтеза функциональных и контролируемых сред РегЭС, реализуемых на базе единого РВП, включая методы их многоуровневого [Алексеев и др., 2009] контроля и диагностики.

1. ОБЩИЙ ПОДХОД В ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РегЭС

1.1. Описание фрагментов РВП с помощью орграфов

Данный подход, ввиду своей простоты и универсальности, является одним из наиболее распространённых способов описания структурных и функциональных особенностей архитектур вычислительных систем. Он заключается в том, что любой выделенный фрагмент аппаратной архитектуры РВП РегЭС с условным порядковым номером i можно описать орграфом $G_i = G_i(X_i, R_i)$, где

$X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ — множество направленных рёбер (дуг) орграфа, определяющих связи между КЛБ, образующими i -ю архитектуру РВП $R_i = \{r_1, r_2, \dots, r_e\}$ — множество функциональных КЛБ-вершин орграфа G_i , реализующих базовые логико-арифметические операции.

Если орграф G_i описывает только топологию между КЛБ-вершинами, и логико-арифметические функции КЛБ-вершин не заданы, то будем говорить о *структурном графе* фрагмента РВП. Если же учитываются и функции, реализуемые посредством КЛБ-вершин, то будем говорить о *функциональном графе* фрагмента РВП, или о *структурно-функциональном графе*. Понятно при этом, что любой функциональный граф всегда будет полностью отражать комбинационную схему (или её участок) рассматриваемого фрагмента РВП.

Составную архитектуру выделенных фрагментов РВП РегЭС удобно описывать с помощью объединения непересекающихся [Каляев и др., 2009] подграфов $G_i, i = \overline{1, n}$, каждый из которых соответствует её отдельному функциональному фрагменту. Данную графоаналитическую модель можно записать как

$$G_1(X_1, R_1) \cup G_2(X_2, R_2) \cup \dots \cup G_n(X_n, R_n) = \bigcup_{i=1}^n G_i(X_i, R_i). \quad (1)$$

С помощью объединённых графов (1) можно описывать не только локальные фрагменты РВП, но и представлять РВП в виде единого составного графа $G^{\text{РВП}}$. В этом случае справедлива запись

$$G^{\text{РВП}} = \bigcup_{i=1}^n G_i(X_i, R_i). \quad (2)$$

Изначально, до момента образования в РВП РегЭС аппаратных архитектур, орграф РВП $G^{\text{РВП}}$ является пустым [Алексеев и др., 2005; Емеличев и др., 2015], поскольку не содержит ни одного ребра, т.е. $G^{\text{РВП}} = G^{\text{РВП}}(R) = O_r$, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_e\}$, так как $X = \emptyset$.

Введём теперь одно важное определение, касающееся всех методов аппаратной реализации алгоритмов на базе РВП РегЭС.

Если орграф G_i описывает аппаратную архитектуру в составе РВП, на которой реализуется некоторая булева функция $f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_p)$, то такую функцию будем называть *конфигурационной функцией* i -го фрагмента (аппаратной архитектуры) РВП РегЭС. Запишем это определение в виде формального преобразования

$$G_i = G_i(X_i, R_i) \Rightarrow f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_p),$$

которое в рамках всех графоаналитических моделей, описывающих функциональные фрагменты РВП РегЭС можно назвать взаимно-однозначным, т.е. имеет место быть и обратный переход от $f_i(x)$ к G_i . С учётом (2), ту функцию, которая будет соответствовать графу $G^{\text{РВП}}$, будем называть *конфигурационной функцией* РВП РегЭС. Данное определение конфигурационной функции отличается от определения, предложенного в ранних работах [Савкин, 2015б, 2016]. Это уточнение является следствием разработки новых методов многоуровневой диагностики РегЭС и обуславливается, прежде всего, необходимостью формирования единого терминологического словаря для описания различных категорий отказоустойчивых систем на базе ПЛИС.

Уточнённое понятие конфигурационной функции используется при описании процедур регенерации фрагментов РВП РегЭС. Под *регенерацией*, в свою очередь, понимается *процесс* низкоуровневого восстановления одиночных (либо групповых) неисправностей функционально задействованных КЛБ, который достигается за счёт локальной либо полной реконфигурации РВП, направленной на функциональное замещение вышедшего из строя КЛБ (группы КЛБ) логическим блоком из состава избыточной резервной группы КЛБ. Процесс регенерации в РВП осуществляется в динамическом режиме, при этом архитектурой РВП предусмотрено равномерное распределение как задействованных в реализации функциональной архитектуры наборов КЛБ, так и резервных наборов КЛБ. Отдельные фрагменты (архитектуры) РВП предусматривают применение мажоритарных схем резервирования, образуя тем самым *квазистационарные архитектуры*. При этом приставка «квази» означает, что в случае исчерпывания мажоритарного соотношения исправен/неисправен в процессе эксплуатации РегЭС, вычислительный канал также может восстановиться за счёт реконфигурации РВП, т. е. за счёт процедуры регенерации.

Кроме того, одним из возможных вариантов восстановления полного фрагмента РВП с мажоритарной схемой резервирования является её «перенос» на резервный участок РВП, предусмотренный общей архитектурой единого РВП и его вычислительным ресурсом. Более подробно об основных способах регенерации будет сказано в третьем разделе данной статьи.

Необходимо коротко упомянуть ещё о ряде способов описания процессов функционирования РегЭС и РВС в целом, которые имеют непосредственное отношение к методам графоаналитического моделирования РегЭС.

1.2. Карты состояний РВП РегЭС

Поскольку все РегЭС являются цифровыми системами, то к ним применимы и все известные на сегодняшний день методы анализа и синтеза, характерные для данного типа дискретных систем. Помимо широко распространённых диаграмм (или карт) Вейча-Карно, к *картам состояний* можно отнести все табличные способы задания и представления данных о переходных процессах, происходящих в РегЭС. *Картой состояний* можно называть любое табличное (или матричное) представление информации как о структуре, так и о функциях рассматриваемой системы в дискретные моменты времени t_q . Сам термин «карты состояний» слишком обширен и встречается практически во всех областях науки и техники, имеющих дело с рассмотрением дискретных объектов, включая информацию о них.

Применительно к РегЭС и в особенности к их графоаналитическим моделям, примерами простейших карт состояний могут служить матричные способы задания графов, описывающих аппаратные архитектуры в выделенных фрагментах РВП. К этим способам относятся, прежде всего, матрицы смежности, матрицы инцидентности и матрицы изоморфности. С помощью них в случаях, когда граф G_i является графом малой размерности, довольно удобно описывать исправные и неисправные состояния КЛБ в фрагментах РВП, либо состояния фрагментов РВП РегЭС в общем.

Вместе с тем нередко прибегают к другим подходам, учитывающим вероятности переходов системы (или подсистем) из одного состояния в другое, и которые также имеют непосредственное отношение к графоаналитическим методам моделирования РегЭС.

1.3. Логико-вероятностные подходы и структурные схемы надёжности

В целом логико-вероятностные способы анализа дискретных систем и переходных процессов в них также довольно разнообразны и активно развиваются в настоящее время как в отношении применяемой в них предикатной логики, так и в рамках используемых в них вероятностных моделей.

Одним из довольно удобных логико-вероятностных способов анализа фрагментов РВП РегЭС являются *схемы функциональной целостности (СФЦ)* [Можаев, 1982; Мусаев, Gladkova, 2010]. Их удобство заключается в строгой ограниченности словаря алгебры логики, посредством которого с помощью графоаналитического моделирования можно исследовать функционирование сложных комбинационных схем. Особенно эффективно с помощью СФЦ описываются однородные вычислительные системы (ОВС), к которым, безусловно, относятся и РегЭС. Подход, основанный на использовании СФЦ, позволяет осуществлять оценку графов G_i на предмет наличия в них логико-арифметических коллизий, что в полной мере может быть использовано при верификации различных графоаналитических моделей РегЭС, а также при построении соответствующих этим моделям деревьев состояний и отказов. Кроме того, подход с применением СФЦ в значительной степени развит и в отношении методов оценки структурных схем надёжности.

Говоря об унифицированных методах анализа структурных схем надёжности, которые также находят широкое применение и в расчёте надёжности вычислительных систем, на практике во многих случаях используются и классические подходы, оперирующие с уравнением Колмогорова-Чепмена [Шкляр, 2009]. В таких графоаналитических моделях в качестве вершин орграфа рассматриваются уникальные состояния системы на высоком аппаратном уровне (к примеру, вычислительный модуль «Исправен»/«Неисправен»), а в качестве предикатных дуг используются интенсивности переходов одних состояний в другие.

На рис. 1 в качестве простейшего примера переходных состояний вычислительной системы на верхнем аппаратном уровне, представлен граф переходов общего состояния РегЭС.

В общем случае множество всех состояний S РегЭС можно разделить на два подмножества: подмножество исправных состояний S_1 , в которых РегЭС функционирует удовлетворительно, и подмножество неисправных состояний S_0 , в которых РегЭС неработоспособна. При этом, $S_1 \subset S$, $S_0 \subset S$, $S = S_1 \cup S_0$. На рис. 1 условно показано также третье состояние РегЭС — состояние регенерации РВП $S_{\text{рег}}$, которое является в некотором смысле обособленным, поскольку в различные моменты времени t может относиться либо к множеству S_1 , т. е. $S_{\text{рег}}(t) \subset S_1(t)$, либо к множеству S_0 , т. е. $S_{\text{рег}}(t) \subset S_0(t)$.

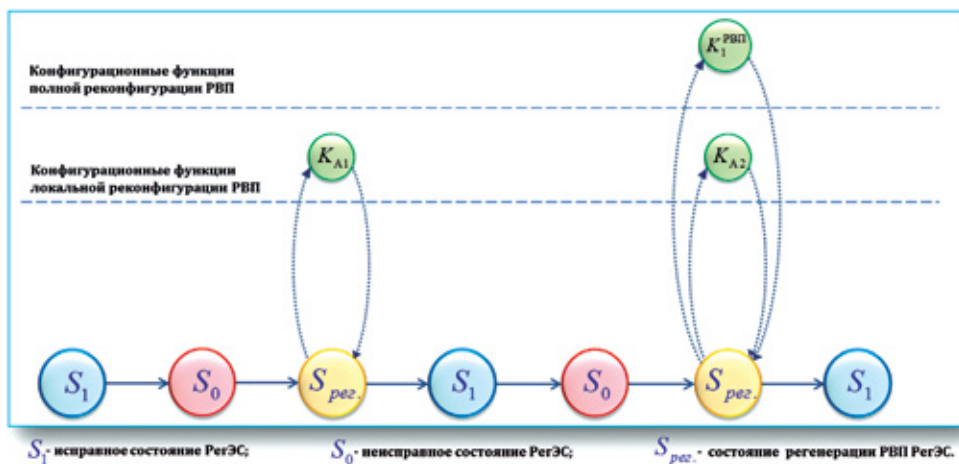


Рис. 1. Граф переходов общего состояния РВП ПерЭС

Малая эффективность методов анализа состояний подсистем верхнего аппаратного уровня ПерЭС с помощью уравнения Колмогорова-Чепмена обуславливается не только необходимостью оценки большого числа состояний системы, соответствующих множеству состояний $S_{\text{рег}}$. Она связана ещё и с тем, что при расчёте вероятностных характеристик состояний ПерЭС, необходимо точно знать к какому множеству (S_1 или S_0) принадлежит каждый элемент-состояние из множества $S_{\text{рег}}$. Эта задача представляет собой задачу многоуровневой диагностики РВП, решение которой осуществляется методами, соответствующими конкретным типам отказоустойчивых архитектур РВП ПерЭС. С точки зрения всех моделей ПерЭС, относящихся к оценке состояния системы на верхних аппаратных уровнях, этот подход в целом является весьма нелогичным и малоинформативным, поскольку не учитывает причинно-следственные связи на уровне КЛБ, приводящие к тому или иному состоянию ПерЭС на её верхних аппаратных уровнях. В тоже время этот подход может быть вполне приемлемым при исследовании структурных схем надёжности отдельных фрагментов РВП ПерЭС.

Все переходные процессы в состояниях ПерЭС всегда отражаются на конфигурационных функциях системы $K_i(x, t) = f_i(x, t)$, которые одновременно могут выступать в качестве индикаторов как локальных, так и полных структурно-функциональных изменений РВП. Это, в свою очередь, составляет отдельное направление исследований ПерЭС, которое в данной работе не рассматривается.

2. КОМБИНАТОРНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПерЭС

Все процессы адаптации аппаратной архитектуры РВП к неисправностям и отказам на его участках носят в большинстве случаев чисто комбинаторный характер. Например, выполнение в РВП ПерЭС процедур регенерации есть не что

инное, как решение таких классических комбинаторных задач, как задача о коммивояжёре, задача о назначениях, задача поиска минимального остовного дерева, задача о паросочетаниях и многие другие [Алексеев и др., 2005; Емеличев и др., 2015; Тараканов, 1985]. Поэтому любые методы проектирования и анализа фрагментов РВП РегЭС, не учитывающие комбинаторные свойства прилегающих друг к другу соседних КЛБ-вершин будут являться главным образом неполными, а потому и малоэффективными [Тараканов, 1985; Строгонов, 2010].

Далее рассмотрим коротко ряд моментов, касающихся топологических ограничений орграфов G_i при реконфигурации фрагментов РВП, и сформулируем проблему количественной оптимизации КЛБ-вершин в РВП РегЭС, без которой в общем случае невозможно построение корректной и, как следствие, адекватной графоаналитической модели.

2.1. Топологические ограничения графов в РВП РегЭС

Вопрос о *топологических ограничениях орграфов* G_i в РВП встаёт в процессе адаптивной (по отношению к возникающим в архитектурах РВП неисправностям) реконфигурации РегЭС и имеет непосредственное отношение к процедурам регенерации как отдельных функциональных КЛБ-вершин, так и целых фрагментов РВП РегЭС. В целом этот вопрос довольно обширен и требует детального рассмотрения каждого из примеров. Примерами, о которых в данном случае идёт речь, является анализ каскада итерационных преобразований исходного графа в любые возможные (в пределах ограниченной области РВП) орграфы

$$G_1(X_1, R_1) \rightarrow G_2(X_2, R_2) \rightarrow \dots \rightarrow G_z(X_z, R_z),$$

каждый из которых сопровождается перераспределением связей в пределах матричного набора КЛБ-вершин. Индекс $z = w + g$ в данной последовательности обозначает включение набора «разрешённых» орграфов w и набора «запрещённых» орграфов g . К первому набору относятся все орграфы, удовлетворяющие СФЦ, о которой говорилось в п. 1.3, а ко второму те, которые не удовлетворяют СФЦ. С помощью выявления «разрешённых» графов делается заключение о возможных способах регенерации выделенных фрагментов РВП РегЭС.

Проблему топологических ограничений можно также назвать проблемой *перебора «разрешённых» орграфов*, или проблемой оптимального перераспределения топологии логико-арифметических связей относительно исходного графа $G_1(X_1, R_1)$ с сохранением его СФЦ. В общем случае этот класс задач решается ранжированием по приоритету графов из набора w для каждого из возможных способов регенерации рассматриваемого фрагмента РВП. Решение задач в ряде случаев сопровождается поиском набора графов $G^* = \{G_1^*, G_2^*, \dots, G_l^*\}$, изоморфных исходному, т. е. таких, что

$$G_1(X_1, R_1) \cong G_1^*(X_1, R_1) \cong G_2^*(X_2, R_2) \cong \dots \cong G_l^*(X_l, R_l).$$

Это в известном смысле упрощает поиск «разрешённых» графов для выделенных фрагментов РВП, поскольку речь в данном случае идёт об архитектурах

однородного типа, а следовательно и об однородных КЛБ-вершинах. Но и в случаях присутствия неоднородных КЛБ-вершин эта вспомогательная процедура всегда предусматривается.

2.2. Проблема количественной оптимизации избыточных КЛБ-вершин в РВП РегЭС

В начале работы отмечалось, что в качестве локальных архитектур РВП могут быть использованы и квазистационарные архитектуры, не требующие частой реконфигурации выделенной области РВП РегЭС. Доминирующим классом таких архитектур, используемых, в том числе и в бортовых системах КА, являются архитектуры с низкоуровневым мажоритарным резервированием, стандартные схемы которых представлены на рис. 2.

Переход от архитектуры с одним мажоритарным органом к архитектуре с мажоритарными слоями осуществляется в тех случаях, когда необходимо повысить надёжность самого мажоритарного органа. В пособии [Орлов, Цилькер, 2014] даются примеры расчёта надёжности высокоуровневых аппаратных архитектур, которые также можно взять и за основу расчёта схем надёжности фрагментов РВП РегЭС, реализующих низкоуровневое мажоритарное резервирование.

Ввиду масштабности использования различных способов резервирования КЛБ в РВП и учитывая общее количество задействованных в резервировании КЛБ в рамках различных моделей РегЭС, низкоуровневое резервирование фрагментов РВП РегЭС предлагается относить к категории *низкоуровневого мультирезервирования* аппаратных архитектур РВП, или просто мультирезервирования.

И квазистационарные архитектуры и архитектуры неквазистационарного типа требуют довольно качественного предварительного расчёта вычислительных ресурсов РВП РегЭС, на которые отводится роль «горячего» резервирования КЛБ и отдельных фрагментов РВП. Методики этих расчётов во многом определяются типами ПЛИС, реализующими единое РВП РегЭС.

В рамках данного раздела необходимо также отметить, что сегодня существует довольно большое число структурных решений по построению отказоустойчивых аппаратных архитектур на ПЛИС, основанных на использовании непозиционных систем счисления, и в частности модулярной арифметики (систем остаточных классов), которые при их реализации в РВП сами по себе предусматривают введение избыточных наборов КЛБ. В ряде случаев такие архитектуры выглядят более рациональными и с точки зрения топологических ограничений орграфов G_r , и с точки зрения выбора оптимального количества избыточных функциональных КЛБ-вершин. Исследование данного вопроса с позиций РегЭС открывает целое независимое направление в разработке отказоустойчивых РегЭС на базе ПЛИС с динамической реконфигурацией, которое в данной работе не затрагивается.

Было упомянуто об оптимальном количестве избыточных функциональных КЛБ-вершин графа G_r , которое позволяет сформулировать общую *проблему количественной оптимизации избыточных КЛБ-вершин* в РВП РегЭС. Для этого рассмотрим рис. 3, на котором в наглядной и упрощённой форме

представлены два размещаемых во фрагменте РВП орграфа $G_1 = G_1(X_1, R_1)$ и $G_2 = G_2(X_2, R_2)$ с выделенными функциональными КЛБ-вершинами r_7 и r_2 .

В окрестности орграфов G_1 и G_2 предусмотрено наличие некоторого набора КЛБ-вершин $R_{изб}^{РВП}$, который может быть использован для функционального замещения (реконfigurацией фрагмента РВП, в котором графы G_1 и G_2 рассматриваются) КЛБ-вершин r_7 и r_2 .

Пусть $G_{A1} = G_1(X_1, R_1) \cup G_2(X_2, R_2)$, где G_{A1} — составной орграф архитектуры РВП, описываемой двумя подграфами G_1 и G_2 . Тогда $R_1 \subset R_{A1}$, $R_2 \subset R_{A1}$ и $R_{изб}^{РВП} \subset R_{A1}$, где R_{A1} — множество КЛБ-вершин фрагмента РВП; $R_{изб}^{РВП}$ — множество резервных (избыточных) КЛБ-вершин, посредством которых осуществляется резервирование функциональных КЛБ-вершин, относящихся к множествам R_1 и R_2 . При этом понятно, что $R_{A1} = R_1 \cup R_2 \cup R_{изб}^{РВП}$.

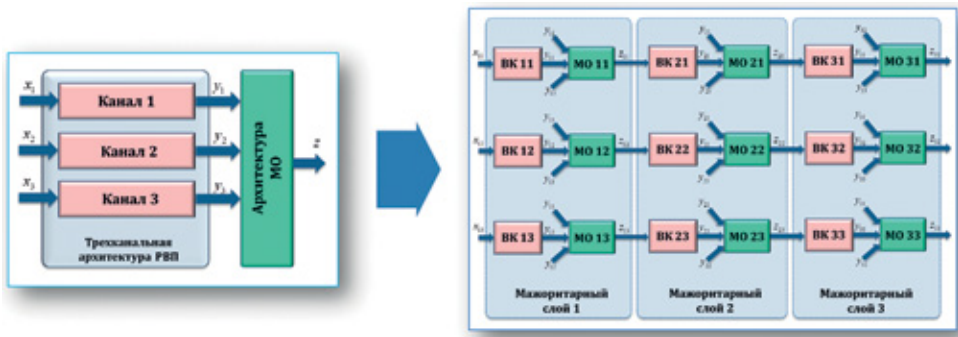


Рис. 2. Стандартные схемы мажоритарного резервирования

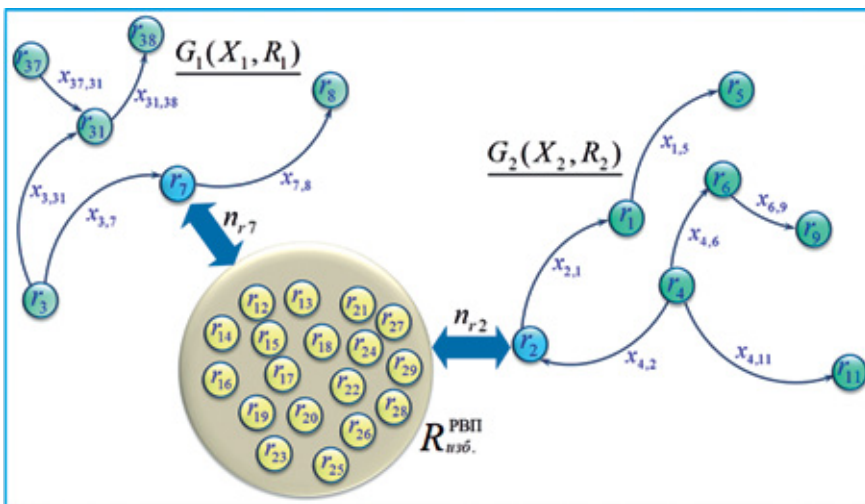


Рис. 3. Проблема количественной оптимизации функциональных КЛБ-вершин в РВП

Вероятность безотказной работы архитектуры РВП p_{A_1} в общем случае будет определяться топологией орграфов G_1 и G_2 , поскольку вероятности безотказной работы всех КЛБ-вершин РВП РегЭС $p_{\text{КЛБ}} \approx \text{const}$, т. е.

$$p_{A_1} = f(p_{G_1}, p_{G_2}) = f(p_{G_1 \cup G_2}).$$

Кроме того, во фрагменте РВП РегЭС всегда существует также некоторый оргграф $G_3 = G_3(X_3, R_3)$, на котором реализуется избыточная схема резервирования КЛБ-вершин графов G_1 и G_2 , и который на данном рисунке не представлен. Сделаем грубое допущение, связанное с тем, что граф G_3 появляется только в процессе регенерации архитектуры РВП. Это допущение в определённом смысле будет представлять собой ту самую *потенциальную среду* РегЭС, о которой говорилось в работе [Савкин, 2015а], при этом подразумевается, что $R_{\text{изб}}^{\text{РВП}} \subseteq R_3$, т. е. $G_3 = G_3(X_3, R_{\text{изб}}^{\text{РВП}})$.

Теперь необходимо заметить, что в рамках идеальной графоаналитической модели РегЭС, в которой каждая КЛБ-вершина $r_m, m = \overline{1, e}$ может быть зарезервирована h раз (h -кратное резервирование), будет выполняться следующее условие.

Для каждого элемента (КЛБ-вершины) r_m , входящего в состав множества R_{A_1} , предоставлен набор из h элементов $\{r_1^*, r_2^*, \dots, r_h^*\} \subset R_{\text{изб}}^{\text{РВП}}$. Процедура регенерации будет заключаться в том, что при выходе из строя элемента r_m будет производиться его функциональное замещение (за счёт локальной или полной реконфигурации фрагмента РВП) на один из элементов набора $\{r_1^*, r_2^*, \dots, r_h^*\}$, т. е.

$$r_m \rightarrow r_1^* \rightarrow r_2^* \rightarrow \dots \rightarrow r_h^*.$$

Ну а поскольку доступ к данному набору ограничен прежде всего топологически, то задача количественной оптимизации функциональных КЛБ-вершин на первом этапе проектирования РегЭС заключается в том, чтобы обеспечить доступ функциональных КЛБ-вершин к максимально возможному числу элементов резервного набора h . Это условие можно представить в виде выражения

$$\left\{ h \mid \forall r_m \in R_{A_1} \exists \{r_j^*\}, j = \overline{1, h} \right\} \rightarrow \max.$$

Поскольку на практике довольно сложно обеспечить резервирование всех функциональных КЛБ-вершин r_m объединения орграфов $G_1 \cup G_2$, то на втором этапе осуществляется назначение избыточных КЛБ-вершин из множества $R_{\text{изб}}^{\text{РВП}}$ к тем функциональным КЛБ-вершинам, которые будут резервироваться. При этом учитывается влияние количественных соотношений между задействованными (т. е. функциональными) и резервными КЛБ на общую вероятность безотказной работы p_{A_1} .

Проблема количественной оптимизации КЛБ-вершин в самом общем случае формулируется следующим образом: как обеспечить распределение резервного и функционального ресурсов для каждой из КЛБ-вершин r_m орграфов G_1 и G_2 так, чтобы не снизить общей надёжности фрагмента РВП при выходе из строя любой из функциональных КЛБ-вершин каждого из этих орграфов?

Определение количественного соотношения между задействованными в вычислительной операции КЛБ-вершинами и КЛБ-вершинами, отводящимися для их восстановления функциональным замещением при реконфигурации фрагмента РВП (т. е., при выполнении процедуры регенерации), играет важную роль в способах повышения надёжности архитектур РВП РегЭС. Решение задачи количественной оптимизации КЛБ-вершин полностью определяется характеристиками архитектур ПЛИС, выбранных для реализации единого РВП РегЭС.

Проблемы топологических ограничений и количественной оптимизации РегЭС могут рассматриваться как независимо, так и в совокупности, в зависимости от конкретных способов локальной либо полной реконфигурации РВП РегЭС. При этом понятно, что данные проблемы полностью взаимосвязаны, поскольку речь идёт о выделенном фрагменте РВП, ограниченном как с точки зрения возможных конфигурационных связей между КЛБ, так и с точки зрения общего количества последних.

Далее введём понятия целевого и избыточного конфигурационных графов РегЭС, и с их позиций коротко поясним процесс выполнения некоторых процедур регенерации КЛБ-вершин в выделенных фрагментах РВП РегЭС.

3. ЦЕЛЕВОЙ И ИЗБЫТОЧНЫЙ КОНФИГУРАЦИОННЫЕ ГРАФЫ РегЭС

Вводимые здесь понятия целевого и полного графов являются универсальными по отношению ко всем ранее рассмотренным моделям РегЭС.

Под *целевым графом* РегЭС будем понимать граф $G^P = G(X^P, R^P)$, не содержащий избыточных КЛБ-вершин.

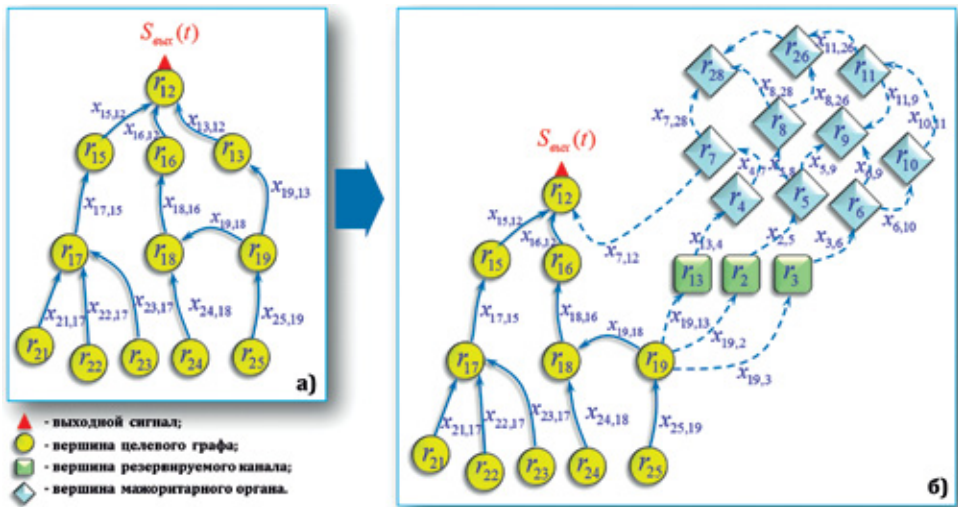


Рис. 4. Простейший пример целевого и избыточного конфигурационных графов РегЭС

Под *избыточным графом* RegЭС , напротив, будем понимать граф $G^F = G(X^P \cup X^R, R^P \cup R^R) = G\left\{\left\{x \mid x \in X^P \vee x \in X^R\right\}, \left\{r \mid r \in R^P \vee r \in R^R\right\}\right\}$, имеющий в своём составе некоторую совокупность избыточных КЛБ-вершин.

Здесь X^P и X^R представляют собой множества КЛБ-вершин, относящихся, соответственно, к функциональной и избыточной группам конфигурационных связей внутри графов G^P и G^F , а R^P и R^F относятся к соответствующим наборам функциональных и избыточных КЛБ-вершин графов G^P и G^F . При этом понятно, что целевой граф всегда будет являться подграфом полного графа, поэтому $G^P \subseteq G^F$.

На рис. 4 представлены примеры целевого G^P (слева) и избыточного G^F (справа) графов фрагмента РВП, отличающиеся тем, что в составе избыточного графа G^F имеется подграф $G^M \subset G^F$, реализующий трёхканальное мажоритарное резервирование функциональной КЛБ-вершины исходного целевого графа r_{19} , поэтому $G^F = G^P \cup G^M$.

Задачей любой графоаналитической модели RegЭС является сохранение целостности структуры целевого графа, который как не трудно догадаться всегда будет соответствовать СФЦ фрагмента РВП. Полный граф же полностью описывает взаимодействие функциональной и потенциальной (или контролирующей) сред RegЭС в едином РВП, обеспечивая все необходимые процедуры регенерации КЛБ-вершин целевого графа RegЭС .

Теперь с точки зрения определения целевого графа и рассмотренной задачи количественной оптимизации КЛБ-вершин можно дать уточнённое определение RegЭС . RegЭС это такая РВС, комплекс аппаратно-программных средств которой стремится обеспечить сохранение структурно-функциональной целостности целевого орграфа за счёт количественной оптимизации избыточных функциональных вершин в режиме реального времени и в течение всего срока эксплуатации RegЭС . Именно поэтому RegЭС можно относить к категории целеустремлённых систем, способных адаптировать свою внутреннюю аппаратную архитектуру как к решаемым задачам, так и к изменяющимся условиям внешних воздействующих факторов. Последний аспект является очень важным ввиду рассмотрения применимости RegЭС в качестве бортовых систем цифровой обработки данных в составе современных КА.

Рассмотрим коротко некоторые базовые типы процедур регенерации функциональных КЛБ-вершин с позиций предложенного определения целевого графа RegЭС и способов локальной реконфигурации фрагментов РВП.

3.1. Процедуры регенерации РВП на основе смещения конфигурационного графа RegЭС

Данный тип регенерации КЛБ-вершин относится к тем случаям, когда реализуются так называемые «плавающие» в РВП аппаратные архитектуры. Регенерация отказавших (к примеру в результате воздействия тяжёлых заряженных частиц) КЛБ, осуществляется за счёт перемещения полного графа RegЭС в едином РВП.

В тех случаях, когда вычислительный ресурс единого РВП не позволяет осуществить перемещение полного орграфа G^F на требуемое число КЛБ

в сетке РВП, полный орграф может быть «урезан». Смещение полного орграфа G^F в РВП может осуществляться как по итерациям, в каждой из которых осуществляется проверка целостности целевого графа G^P , так и сразу, т. е. в требуемое место РВП относительно начальной позиции графа, в которой была зафиксирована одиночная либо групповая неисправность КЛБ-вершин.

Процедуры регенерации РВП на основе смещения конфигурационного графа РегЭС в зависимости от размерности исходного полного графа G^F могут осуществляться как за счёт полной реконфигурации РВП, так и за счёт локальной.

3.2. Регенерация РВП с помощью локального обхода неисправных КЛБ-вершин

Регенерация РВП с помощью локального обхода неисправных КЛБ-вершин относится к неисправностям выделенных фрагментов РВП на внешних участках, т. е. периферии полного графа G^F .

Суть данного типа регенерации иллюстрирует рис. 5.

Из данного рисунка видно, что в целом исходный граф G_1 заменяется на другой граф G_2 , который в большинстве случаев содержит большее число КЛБ-вершин по сравнению с исходным.

Все возможности РегЭС по регенерации фрагментов РВП сводятся к решению рассмотренных во втором разделе задач, связанных и с топологическими ограничения графов в РВП РегЭС и с проблемой количественной оптимизации избыточных функциональных КЛБ-вершин.

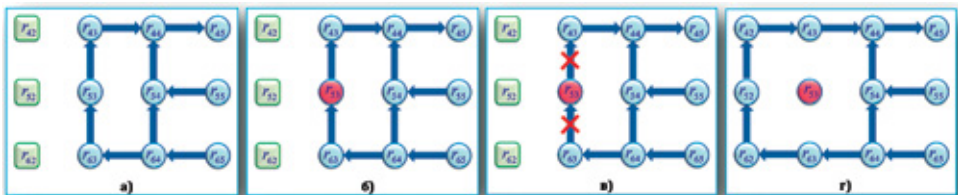


Рис. 5. Восстановление неисправного КЛБ обходом (при реконфигурации РВП)

3.3. «Выворачивание» графа на периферию при внутренних неисправностях РВП

Выворачивание графа на периферию РВП относится к тем типам регенерации в РегЭС, которые достигаются, как правило, за счёт полной реконфигурации единого РВП РегЭС. Вместе с тем данный тип регенерации является крайне редким и к нему можно прибегать лишь при тотальных групповых неисправностях в центральной (причём довольно обширной) области РВП.

Во всех случаях «выворачивания» графа на периферию речь идёт только о сохранении целевого графа G^P . Если данный граф удаётся построить на периферийном участке РВП, то из оставшихся избыточных КЛБ-вершин по-

этапно наращиваются фрагменты, реализующие резервирование вершин целевого графа G^P .

Как в теории, так и на практике построения отказоустойчивых РегЭС на базе ПЛИС наибольший исследовательский интерес представляют первые два типа регенерации КЛБ в выделенных фрагментах РВП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя общий итог по данной работе, необходимо отметить, что ещё одним из перспективных способов графоаналитического моделирования РегЭС является способ, основанный на использовании диаграмм Юнга. Основные преимущества и недостатки данного подхода рассматривались ранее [Савкин, 2016] и к настоящему времени не потеряли своей актуальности, ввиду того, что позволяют учитывать как комбинаторные, так и топологические особенности фрагментов РВП при их реконфигурации. Более того в перспективе планируется разработать модифицированный способ графоаналитического моделирования РегЭС, который позволит идентифицировать различного рода логико-арифметические коллизии, возникающие не только по причинам неисправностей КЛБ или внутрисхемных цепей связи, но и по причинам локальной рассинхронизации сигналов после реконфигурации.

Итак, в данной работе был проведён краткий обзор и общий анализ известных на сегодняшний день методов графоаналитического моделирования комбинационных схем, подходящих для их приложения к различным моделям РегЭС. Были показаны подходы по анализу, синтезу, оптимизации и общей оценке архитектур вычислительных систем в рамках большинства типов РегЭС. Рассмотренные подходы в целом были основаны на комбинаторных и топологических ограничениях фрагментов РегЭС, возникающих в процессе локальной и полной реконфигурации единого РВП.

Была сформулирована общая проблема количественной оптимизации КЛБ-вершин, играющая важную роль в методах повышения надёжности функционирования РегЭС.

Показаны основные принципы функционирования РегЭС на основе их комбинированных графоаналитических моделей.

Рассмотренные вопросы можно использовать как при графоаналитическом моделировании РегЭС, так и при разработке контрольно-диагностических алгоритмов, обеспечивающих оптимальное взаимодействие функциональных и контролирующих сред в РВП РегЭС, включая возможности по их взаимозамещению.

ЛИТЕРАТУРА

- [Акофф, Эмери, 1974] *Акофф Р., Эмери Ф.* О целеустремлённых системах: Пер. с англ. / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Сов. радио. 1974. 272 с.
- [Алексеев и др., 2005] *Алексеев В. Е., Таланов В. А.* Графы. Модели вычислений. Структуры данных: Учебник. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. 307 с.
- [Алексеев и др., 2009] *Алексеев А. А., Кораблёв Ю. А., Шестопалов М. Ю.* Идентификация и диагностика систем. М.: Изд. центр «Академия». 2009. 352 с.

- [Богданов и др., 2004] *Богданов А. В., Корхов В. В., Мареев В. В., Станкова Е. Н.* Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем: Курс лекций: Учеб. пособие. М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-Университет Информационных Технологий», 2004. 176 с.
- [Грушанский, Дергачев, 2008] *Грушанский В. А., Дергачев А. А.* Проектирование и эффективность летательных аппаратов. М.: Вузовская кн., 2008. 248 с.
- [Давыдов, Репин, 1996] *Давыдов Ю. Т., Репин А. И.* Основы оптимизации и комплексирования бортовых информационных систем: Учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 1996. 172 с.
- [Емеличев и др., 2015] *Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И.* Лекции по теории графов: Учеб. пособие. 4-е изд. М.: Ленанд, 2015. 390 с.
- [Каляев и др., 2009] *Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. И. А. Каляева. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
- [Можаев, 1982] *Можаев А. С.* Логико-вероятностный подход к оценке надёжности автоматизированных систем управления. СПб.: ВМА им. Гречко А. А. Депонирована п/я А-1420 № Д047550, 1982. 24 с.
- [Мусаев, Gladkova, 2010] *Мусаев А. А., Gladkova И. А.* Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем // Тр. СПИИРАН. 2010. Вып. 12. С. 75–96.
- [Орлов, Цилькер, 2014] *Орлов С. А., Цилькер Б. Я.* Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. 3-е изд. Стандарт третьего поколения. СПб.: Питер, 2014. 688 с.
- [Савкин, 2015a] *Савкин Л. В.* Регенеративные электронные системы в космических системах и комплексах // Вестн. кибернетики. 2015. № 2(18). С. 3–32.
- [Савкин, 2015b] *Савкин Л. В.* К вопросу синтеза функциональных и контролирующих сред в регенеративных локальных электронных системах // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международ. научно-технич. конф. «ИНТЕРМАТИК-2015» / Под. ред. акад. РАН А. С. Сигова. Ч. 4. М.: МИРЭА, 2015. С. 105–108.
- [Савкин, 2016] *Савкин Л. В.* Диаграммы Юнга в математическом моделировании бортовых регенеративных электронных систем летательных аппаратов // Гагаринские чтения-2016: 42-я Международ. молодёжная науч. конф.: Сб. тез. докл.: В 4 т. Т. 1. М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 590–591.
- [Строгонов, 2010] *Строгонов А. В.* Программируемая коммутация в ПЛИС: взгляд изнутри // Компоненты и технологии. 2010. № 11. С. 56–62.
- [Тараканов, 1985] *Тараканов В. Е.* Комбинаторные задачи и (0, 1)-матрицы. М.: Наука, 1985. 192 с.
- [Уваров, 2007] *Уваров С. С.* Проектирование реконфигурируемых отказоустойчивых систем на ПЛИС с резервированием на уровне ячеек // Автоматика и телемеханика. 2007. № 9. С. 176–189.
- [Хорошевский, 2008] *Хорошевский В. Г.* Архитектура вычислительных систем: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 520 с.
- [Шальто, 2000] *Шальто А. А.* Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000. 780 с.
- [Шкляр, 2009] *Шкляр В. Н.* Надёжность систем управления: учебное пособие / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2009. 126 с.
- [Hauck, 2007] *Hauck S.* Reconfigurable computing: The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.
- [Grout, 2008] *Grout I.* Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs. Elsevier Ltd. Publ., Oxford, 2008. 724 p.

GRAPHIC-ANALYTICAL SIMULATION OF THE SPACECRAFT ONBOARD REGENERATIVE ELECTRONIC SYSTEMS

L. V. Savkin

PSC "Radiofizika"

In operation problems of graphic-analytical simulation of earlier offered spacecraft onboard regenerative electronic systems are researched. In the first part of operation the short review of graphic-analytical methods in simulation of the reconfigurable computing architecture suitable to simulation of the regenerative electronic systems is this. In the second part problematic issues of combinatorial restrictions and optimization of graphic-analytical models of regenerative electronic systems are considered, the problem of the quantitative optimization of the functional graphs vertices is formulated. In the third part the main methods of regeneration of a reconfigurable computing field fragments from the line items entered in the real operation concepts of target and excess configuration graphs are considered.

Keywords: reconfigurable computing field, graphic-analytical model, fragment, digraph, redundancy, target graph, excess graph.

Savkin Leonid Vasilyevich — expert, applicant PhD, leo-san-86@mail.ru

МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЕРСЕПТРОНЫ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ: АППАРАТНЫЕ ПОДХОДЫ НА БАЗЕ ПЛИС FPGA

Л. В. Савкин¹, В. Г. Дмитриев², Е. А. Федоров^{2,3}

¹ Публичное акционерное общество «Радиофизика» (ПАО «Радиофизика»)

² Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина (НПО им. С. А. Лавочкина)

³ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)

В работе рассмотрены некоторые практические аспекты аппаратной реализации нейросетевых алгоритмов обработки данных, которые могут быть использованы в бортовых системах космических аппаратов (КА), включая бортовые комплексы управления. Основной акцент в работе сделан на использование многослойных перцептронных моделей искусственных нейронных сетей, реализуемых преимущественно на базе программируемых логических интегральных схем класса FPGA. Коротко изложены основные результаты исследований по аппаратной реализации многослойных перцептронов для решения задач обработки информации на борту КА, сводимых к задачам распознавания и классификации.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, искусственная нейронная сеть, многослойный перцептрон, распознавание, классификация.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени создан довольно богатый инструментарий аппаратных и программных средств, реализующих самые разнообразные модели искусственных нейронных сетей (ИНС) [Галушкин, 2010; Грибачев, 2006а, б; Иванов, 2012; Muthuramalingam et al., 2008]. Отдельные структурные модели ИНС уже прочно вошли в методы как аналоговой, так и цифровой обработки информации, доказав свою эффективность перед традиционными методами обработки информации. Если на начальных этапах развития методов обработки информации с использованием ИНС, последние в большинстве случаев вызывали огромный скепсис и даже негативное отношение среди немалого числа высококвалифицированных специалистов многих областей науки и техники, то на сегодняшний день решение широкого круга прикладных задач невозможно представить себе без задействования той или иной конкретной модели ИНС. Разнообразие отличных друг от друга концепций ИНС настолько обширно, что весьма сложной представляется задача произвести полную классификацию существующих сегодня моделей ИНС [Логовский, 2000; Хайкин, 2006].

Вполне естественным является тот факт, что решение ряда узкоспециализированных задач с использованием ИНС представляет собой практический интерес и для бортовых служебных и целевых систем космических аппаратов (КА). При этом речь идёт не об альтернативных вариантах решения задач с применением ИНС, а о первоочередных способах решения, которые невозможно

Савкин Леонид Васильевич — специалист, соискатель, leo-san-86@mail.ru

Дмитриев Виктор Геннадьевич — схемотехник, соискатель

Федоров Евгений Анатольевич — программист, аспирант

реализовать более эффективно без задействования той или иной модели ИНС. Очень убедительные примеры подобного рода задач приводятся в монографии [Ефимов и др., 2004].

В рамках данной работы рассматриваются некоторые практические аспекты аппаратной реализации нейросетевых алгоритмов обработки данных, которые могут быть использованы в бортовых системах космических аппаратов (КА), включая бортовые комплексы управления (БКУ) и системы автоматического регулирования [Савкин и др., 2016], относящиеся к служебным системам КА. При этом основной акцент делается на перцептронные модели ИНС, аппаратная реализация которых рассматривается преимущественно на платформах программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) класса Field Programmable Gate Array (FPGA) [Gokhale, Graham, 2005; Nauck, 2007].

Цель работы — исследование возможности применения многослойных перцептронных моделей ИНС, построенных на базе ПЛИС FPGA, для решения штатных задач цифровой обработки информации в бортовых системах КА.

1. НЕЙРОПОДОБНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ НА БАЗЕ ПЛИС

1.1. Классы решаемых задач с помощью ИНС в бортовых системах КА

Алгоритмы цифровой обработки данных в бортовых системах КА реализуются в большинстве случаев чисто программными средствами [Бровкин и др., 2010; Ефимов и др., 2004; Микрин, 2003]. Вместе с тем активно развивающиеся сегодня технологии ПЛИС (в особенности радиационнотойкого исполнения и с возможностью локальной динамической реконфигурации) постепенно начинают привлекать своё внимание со стороны разработчиков бортовой аппаратуры КА в качестве нового класса интегрированных и отказоустойчивых аппаратно-программных платформ, надёжность которых достигается и за счёт резервирования аппаратных архитектур на уровне конфигурируемых логических блоков (КЛБ), и за счёт возможности адаптировать аппаратную архитектуру [Каляев и др., 2009] при помощи реконфигурации к неисправностям и отказам, возникающим в течение всего срока активного существования КА. При этом понятно, что речь в данном случае идёт о бортовых системах КА, строящихся преимущественно на однородных аппаратных архитектурах, отличных от традиционных микропроцессорных бортовых вычислителей [Савкин, Дмитриев, 2015; Савкин и др., 2015].

Реализация любых алгоритмов с использованием ПЛИС относится к аппаратным методам обработки сигналов, поэтому построение нейроподобных (т.е., реализующих какую-либо модель ИНС) архитектур на базе ПЛИС также подразумевает под собой использование аппаратных методов обработки данных посредством той или иной модели ИНС. Этот факт оказывает большое влияние на быстродействие ИНС, разница в котором становится наиболее заметной при сравнении скоростей обработки данных между аппаратными ИНС и ИНС, эмулируемыми программными средствами. При этом, безусловно, речь идёт об ИНС большого порядка и высокой плотности, содержащих в своём составе как значительное количество искусственных нейронов и синапсов ($N_n \approx 1000$ и $N_s \approx 1000$), так и весьма высокое число межнейронных связей

($N_w \approx 100\,000$). Не трудно догадаться, что выигрыш в скорости обработки данных практически во всех случаях всегда остаётся за аппаратными ИНС.

Привлечение ИНС к методам обработки данных в составе бортовых систем КА обуславливается, прежде всего, постоянным повышением требований по автономности функционирования КА, что автоматически влечёт за собой необходимость применения в составе БКУ КА интеллектуальных средств как оценки нештатных ситуаций, так и интеллектуальных способов борьбы с ними.

К большому классу задач, с которыми успешно справляются ИНС, и перцептроны в частности, относятся задачи распознавания [Иванов, 2012; Хайкин, 2006]. К задачам распознавания, в свою очередь, может быть сведено довольно большое число алгоритмов, реализуемых программным образом в БКУ КА: определение некорректных значений параметров движения КА вокруг центра масс, обнаружение ошибок в формирователе команд стабилизации КА и бортового баллистического прогноза, выявление некорректных команд смещения углового состояния КА относительно внешних ориентиров, идентификация ошибок в системе инерциальной навигации и управлении манёврами КА, практически все известные алгоритмы контроля и диагностики высокоинтегрированных подсистем КА и многие другие задачи.

В рамках данной работы наиболее интересны три класса задач, с которыми успешно справляются перцептронные модели ИНС. Наряду с задачей распознавания, это ещё и задачи классификации и аппроксимации [Хайкин, 2006; Иванов, 2012]. Кроме того, во избежание проблем, связанных с так называемым «проклятием размерности» [Иванов, 2012], все исследования по аппаратной реализации многослойных перцептронов на базе ПЛИС FPGA в данной работе проводятся с использованием метода прямого распространения, взятого в качестве основного метода обучения перцептронной модели ИНС.

1.2. Отказоустойчивость нейроподобных архитектур на базе ПЛИС

Высокая степень параллелизма обработки данных совместно с общей аппаратной избыточностью нейроподобных архитектур, реализуемых на базе ПЛИС FPGA, являются важным преимуществом перед программно эмулируемыми ИНС с точки зрения надёжности [Галушкин, 2010; Phatak, 1995; Piuri et al., 1991]. Это связано, прежде всего, с тем, что программно эмулируемые ИНС в общем случае реализуются на более неоднородных микропроцессорных архитектурах. Хотя, безусловно, всё зависит от конкретных структурных схем надёжности, реализующих аппаратные и программные ИНС.

В тоже время необходимо отметить один важный факт, касающийся применения низкоуровневого мажоритарного резервирования в системах обработки данных, строящихся на базе ПЛИС FPGA. Дело в том, что в классических мажоритарных схемах резервирования аппаратных архитектур вероятность безотказной работы всей архитектуры $P_{\text{полн}}$ никогда не может превысить вероятность безотказной работы её мажоритарного органа $P_{\text{МО}}$, т.е. $P_{\text{полн}} \leq P_{\text{МО}}$. Для того чтобы повысить значение $P_{\text{МО}}$ часто прибегают к использованию многослойных схем мажоритарного резервирования, распараллеливающих процессы обработки данных не только в первом слое, но и во всех последующих мажоритарных слоях. Пожалуй, самым интересным следствием этого

решения является то, что принципы функционирования подобных мажоритарных схем отдалённо напоминают не что иное, как функционирование многослойного персептрона!

Таким образом, все попытки построения отказоустойчивых избыточных архитектур с максимальным распараллеливанием данных невольно приводят разработчиков бортовых систем КА к тому, что перед ними на конечном этапе проектирования предстаёт одна из известных моделей ИНС (пусть и простейших), причём не редко в качестве этой ИНС выступает именно многослойный персептрон.

2. АРХИТЕКТУРА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕРСЕПТРОНОВ

2.1. Аппаратная реализация многослойных персептронов на ПЛИС FPGA

Сегодня имеется довольно большое число работ, посвящённых построению нейроподобных архитектур на базе ПЛИС класса FPGA [Дедегкаев, Рыжков, 2013; Казанцев и др., 2004; Himavathi et al., 2007; Omondi et al., 2006]. При этом персептронные модели ИНС ввиду универсальности их приложений и сравнительной простоты принципов их обучения и функционирования пользуются весьма значительной популярностью. Одним из важнейших этапов в проектировании ИНС является выбор функции активации. При этом уже сравнительно давно существует немалое количество модифицированных персептронов Розенблата, использующие как гладкие функции активации (в основном сигмоидальные), так и пороговые.

В данной работе в качестве пороговых функций активации многослойных персептронов использовалась ступенчатая пороговая функция с четырьмя ступенями вверх. В качестве готовой аппаратно-программной платформы по реализации архитектур различных моделей многослойных персептронов была задействована отладочная плата Xilinx ML605 на базе ПЛИС Virtex-6 LX240T FPGA. Архитектура каждого искусственного нейрона была реализована на базе 16-ти КЛБ (вентилей), из которых четыре, управляемые перекрёстной D-триггерной схемой, выполняли роль ступенчатой пороговой функции активации, и четыре были задействованы в качестве синапсов, представляющих собой двусторонние регистры, регулирующие значения разрядов в 8-битном потоке данных, поступающих на входы искусственных нейронов. На выходе каждого из выходных слоёв был предусмотрен суммирующий аппроксимирующий выход Y_{Σ} , реализуемый на базе 12 КЛБ.

В ходе исследований были разработаны три модели многослойных персептронов, две из которых (модели № 2 и № 3) содержат не только статические, но и динамические слои.

К последним, в частности, относится такой тип слоёв архитектуры персептрона, в котором предусмотрена возможность корректировки весов синапсов k -го слоя за счёт реконфигурации обратных связей от выходов функций активации нейронов $(k-1)$ -го слоя. В статических слоях, к которым относятся входной и выходной слои, такая возможность не предусматривается, поэтому к категории динамических слоёв могут относиться только внутренние слои многослойных персептронов.

Таблица 1. Основные характеристики разработанных моделей многослойных персептронов

Основные характеристики моделей ИНС	Модель персептрона								
	№ 1		№ 2		№ 3				
	Входной слой	Внутренние слой (8)	Выходной слой	Входной слой	Внутренние слой (16)	Выходной слой	Входной слой	Внутренние слой (23)	Выходной слой
Количество искусственных нейронов, ед.	18	144	8(+1 _Σ)	18	288	8(+1 _Σ)	18	414	8(+1 _Σ)
Количество задействованных КЛБ (вентилей), ед.	288	2304	128(+12)	288	4608	128(+12)	288	6624	128(+12)
Синапсы задействованы	Нет								
Разрядность входных данных, бит	8(16)								
Функция активации	Пороговая, четырёхступенчатая вверх								
Динамический внутренний слой	Нет								
Аппроксимация выхода	Предусмотрена								
Прямое распространения	Да								
Полносвязность внутреннего слоя	Максимальная (не варьируется)			Максимальная (варьируется)			Максимальная (варьируется)		
Включение обратных связей во внутреннем слое	Да								

Основные характеристики трёх моделей разработанных многослойных перцептронов представлены в табл. 1.

Каждая из моделей многослойных перцептронов, представленных в табл. 1, была исследована в рамках нескольких задач, имеющих непосредственное отношение к задачам цифровой обработки информации, реализуемых в бортовых системах КА, и которые в общем случае можно свести к тривиальным задачам распознавания и классификации.

2.2. Исследования, проводимые с использованием многослойных перцептронов

Одна из задач, с которой успешно справилась только третья модель многослойного перцептрона, заключалась в оценке технического состояния имитационных моделей смежных бортовых подсистем КА, выдающих телеметрическую информацию в виде 32-разрядных последовательностей в БКУ. Имитационные модели также были полностью реализованы аппаратным образом с использованием отладочной платы Xilinx ML605 одновременно с архитектурами многослойных перцептронов. Посредством модели № 3 удалось классифицировать два типа ошибок, связанных с чисто программными и чисто аппаратными неисправностями системы сбора данных одной из смежных бортовых систем КА, в качестве которой выступала система терморегулирования.

С помощью третьей модели многослойного перцептронов также удалось осуществить распознавание данных (векторов), ведущих к «пропаданию» контрольных сумм на контроллере шины мультиплексного канала обмена и увеличению интервалов (на $\Delta t = 20$ мс) между временем прихода контрольных последовательностей и временем их регистрации в системе контроля и диагностики (СКД) БКУ КА.

При задействовании аппроксимирующего выхода разработанная модель трёхслойного перцептрона довольно эффективно осуществляет также и регистрацию моментов выхода контролируемых параметров за пределы их допустимых значений (речь идёт о привязке СКД к бортовой шкале времени). Коридор допустимых значений $\Delta f(t)$, в свою очередь, может определяться суперпозицией линейных и квазилинейных функций, которые изначально задаются с помощью подбора весовых коэффициентов только входного слоя перцептрона. После этого в процессе обучения перцептроном распознаются верхняя $f^{\max}(t)$ и нижняя $f^{\min}(t)$ границы итоговой функции, полученной в результате суперпозиции нескольких (до восьми) исходных функций. Количество итераций при обучении перцептрона составляет значение $N_{st} \leq 20$.

2.3. Некоторые результаты экспериментов

В качестве примера одного из экспериментов по обучению вышерассмотренных моделей многослойных перцептронов на рис. 1–3 приведены графики регистрации ошибок в распознавании матрицы обнуления сигнатур \mathbf{q} , используемой в некоторых типах СКД для подтверждения возможности перехода с одной контрольной точки (КТ) на другую в схемах встроенного контроля (СВК) высокоинтегрированных цифровых устройств.

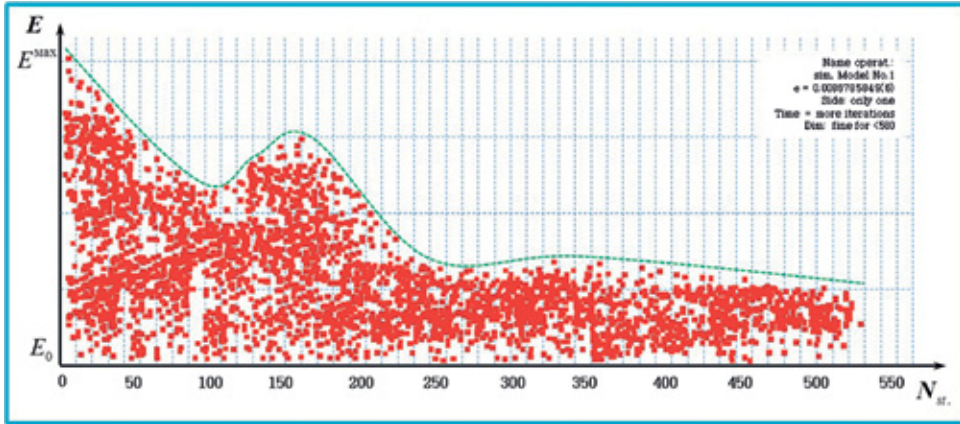


Рис. 1. График ошибок в распознавании матрицы q (модель № 1)

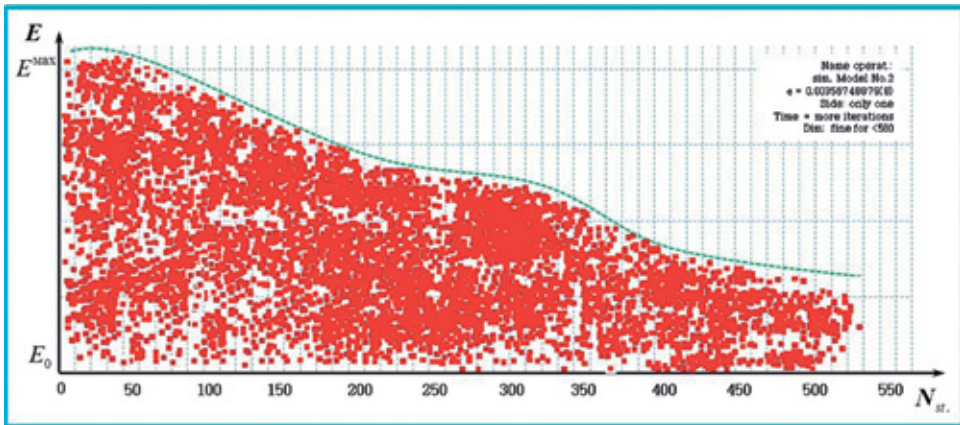


Рис. 2. График ошибок в распознавании матрицы q (модель № 2)

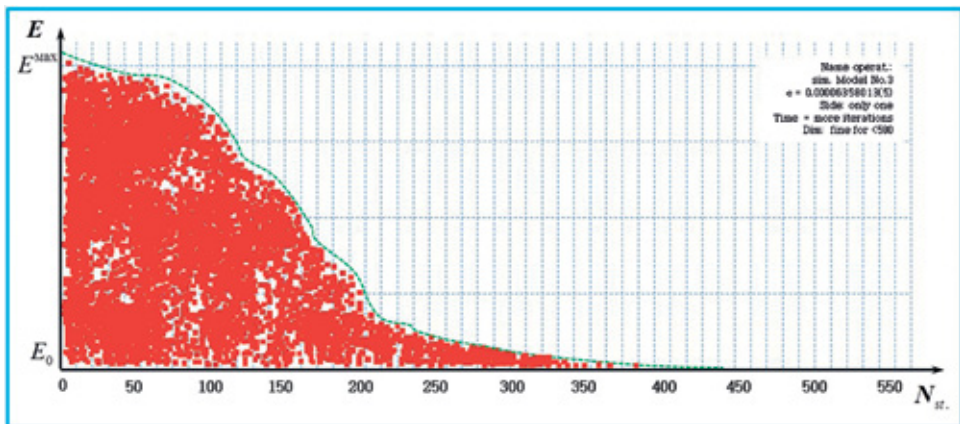


Рис. 3. График ошибок в распознавании матрицы q (модель № 3)

Вектор матрицы обнуления сигнатур \mathbf{q} представляет собой матрицу размерностью $\mathbf{q}_{4 \times 4}$ вида

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(t) = \left\| \beta_{ij}(t) \cdot q_{ij} \right\| = \left\| \begin{array}{cccc} \beta_{11}(t) \cdot 1 & \beta_{12}(t) \cdot 1 & \beta_{13}(t) \cdot 1 & \beta_{14}(t) \cdot 1 \\ \beta_{21}(t) \cdot 1 & \beta_{22}(t) \cdot 0 & \beta_{23}(t) \cdot 0 & \beta_{24}(t) \cdot 1 \\ \beta_{31}(t) \cdot 1 & \beta_{32}(t) \cdot 0 & \beta_{33}(t) \cdot 0 & \beta_{34}(t) \cdot 1 \\ \beta_{41}(t) \cdot 1 & \beta_{42}(t) \cdot 1 & \beta_{43}(t) \cdot 1 & \beta_{44}(t) \cdot 1 \end{array} \right\|, \quad (1)$$

где $\left\| q_{ij}, i = \overline{1, 4}, j = \overline{1, 4} \right\|$ является матрицей-маской, такой, что по периметру этой матрицы всегда стоят единицы, а в центре нули; коэффициент $\beta_{ij}(t)$ является сохраняющим (или «зеркальным») коэффициентом, который определяется исходя из условия

$$\beta_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } q_{ij} \oplus q_{ij}^* = 0, \\ 0, & \text{если } q_{ij} \oplus q_{ij}^* = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где $\left\| q_{ij}^*, i = \overline{1, 4}, j = \overline{1, 4} \right\| = \mathbf{q}^*$ — матрица подтверждения перехода с КТ S_{n-1} на следующую КТ S_n СВК цифрового устройства.

Задача в данном случае состоит в том, чтобы научить перцептрон распознавать не только матрицу обнуления сигнатур \mathbf{q} , но и находить связность структуры между элементами q_{ij} , поступающими на входной слой $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{18}$, даже после их пересортировки.

К примеру, изначально на вход перцептрона поступает поток данных $R_{in}(t)$ с матрицей обнуления сигнатур \mathbf{q} вида

$$R_{in}(t) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \dots & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{21} & \dots & q_{43} & q_{44} & \times & \times \end{bmatrix}, \quad (3)$$

а затем через интервал времени Δt он меняется следующим образом

$$R_{in}(t + \Delta t) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \dots & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & q_{31} & \dots & q_{13} & q_{14} & \times & \times \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Подобные задачи относятся к классу задач обработки информации с неструктурированными данными, с которыми довольно успешно справляются множество моделей перцептронов.

В эксперименте ставилась цель обучить перцептрон распознавать матрицу \mathbf{q} . Из представленных рисунков, видно, что первая и вторая модели многослойных перцептронов снизили уровень ошибок в распознавании матрицы обнуления сигнатур \mathbf{q} за число итераций $N_{st} \approx 530$ ($\Delta t = 80$ мс) приблизительно на 60...70 %. В третьей же модели полного снижения уровня ошибок в распознавании матрицы \mathbf{q} удалось достичь за число итераций $N_{st} \approx 400$ ($\Delta t = 60$ мс). После более точных расчётов начальных коэффициентов синапсов и повторного проведения эксперимента были получены данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение длительности обучения моделей персептронов (распознавание матрицы обнуления сигнатур \mathbf{q})

Длительность обучения по распознаванию матрицы \mathbf{q}	Модель персептрона		
	№ 1	№ 2	№ 3
Число итераций, $N_{ит}$, ед.	350	380	310
Время обучения, Δt , мс	52	57	46

Таким образом, в ходе дальнейшего исследования по аппаратной реализации персептронов, их параметры были отрегулированы таким образом, что обучение в решении задачи распознавания матрицы \mathbf{q} занимало в общей сложности не более 60 мс.

В настоящее время проводятся теоретические расчёты по исследованию тех же структурных моделей многослойных персептронов с сигмоидальной функцией активации.

ВЫВОДЫ

В работе был рассмотрен ряд практических аспектов по аппаратной реализации многослойных персептронов на базе ПЛИС класса FPGA, которые могут быть использованы в бортовых системах обработки данных КА. Особое внимание в работе было уделено использованию многослойных персептронных моделей в тех задачах бортовой обработки информации, которые сводятся к задачам распознавания и классификации, и в ряде отдельных случаев к аппроксимационным задачам. В качестве готовой аппаратно-программной платформы по реализации архитектур различных моделей персептронов была задействована отладочная плата Xilinx ML605 на базе ПЛИС Virtex-6 LX240T FPGA.

Были представлены результаты разработки трёх моделей многослойных персептронов, из которых наибольший практический интерес представлял персептрон с числом внутренних (скрытых) слоёв $N_{скр} = 23$. Разработанный персептрон успешно зарекомендовал себя при решении следующих задач:

- оценка технического состояния имитационных моделей смежных бортовых систем КА, выдающих телеметрическую информацию в виде 32-разрядных последовательностей в БКУ;
- классификация аппаратных и программных неисправностей, возникающих имитационной модели системы терморегулирования КА;
- распознавание данных (векторов), ведущих к «пропаданию» контрольных сумм на контроллере шины мультиплексного канала обмена;
- автоматическая регистрация случаев выхода контролируемых параметров за пределы их допустимых значений с возможностью отслеживания коридора значений $\Delta f(t)$ нескольких одновременно контролируемых функций;
- распознавание матрицы обнуления сигнатур \mathbf{q} в бортовой СКД КА и др.

В перспективе планируется исследовать не только персептронные модели ИНС, но и ряд других. Тот или иной выбор конкретной модели ИНС полностью будет определяться задачами, требующими преимущественно аппаратных решений с использованием ПЛИС класса FPGA.

ЛИТЕРАТУРА

- [Бровкин и др., 2010] *Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В.* и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами / Под ред. проф. А. С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
- [Галушкин, 2010] *Галушкин А. И.* Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 480 с.
- [Грибачев, 2006а] *Грибачев В. П.* Настоящее и будущее нейронных сетей // Компоненты и технологии. 2006. № 5. С. 34–40.
- [Грибачев, 2006б] *Грибачев В. П.* Элементная база аппаратных реализаций нейронных сетей // Компоненты и технологии. 2006. № 8. С. 12–15.
- [Дедегкаев, Рыжков, 2013] *Дедегкаев А. Г., Рыжков А. А.* Метод проектирования структуры нейронных сетей на основе клеточных автоматов // *Universum: Технические науки : электрон. научн. журн.* 2013. № 1(1). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/792> (дата обращения: 28.05.2016).
- [Ефимов и др., 2004] *Ефимов В. В., Козырев Г. И., Лоскутов А. И., Назаров А. В., Яковкин В. А.* Нейрокомпьютеры в космической технике / Под ред. В. В. Ефимова. Кн. 17. Науч. серия «Нейрокомпьютеры и их применение». Ред. А. И. Галушкин. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
- [Иванов, 2012] *Иванов А. И.* Подсознание искусственного интеллекта: программирование автоматов нейросетевой биометрии языком их обучения: Электрон. изд. Пенза: Изд-во ОАО «ПНИЭИ», 2012. 125 с.. URL: http://пниэи.рф/activity/science/bio_neuro.pdf (дата обращения: 28.05.2016)
- [Казанцев и др., 2004] *Казанцев П. А., Остапенко Г. П., Галушкин А. И.* Реализация фрагмента нейронной сети на ПЛИС Xilinx с возможностью изменения весов и функций активации в реальном времени // Тр. 6-й Международ. научно-тех. конф. DSPA-2004. Москва. 2004.
- [Каляев и др., 2009] *Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры.. 2-е изд, перераб. и доп. / Под общ. ред. И. А. Каляева. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
- [Логовский, 2000] *Логовский А. С.* Технология ПЛИС и её применение для создания нейрочипов // Открытые системы. 2000. № 10. URL: <http://www.osp.ru/os/2000/10/178242/> (дата обращения: 28.05.2016).
- [Микрин, 2003] *Микрин Е. А.* Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 336 с.
- [Савкин, Дмитриев, 2015] *Савкин Л. В., Дмитриев В. Г.* О двух перспективных нейросетевых подходах к построению интеллектуальных бортовых измерительно-вычислительных и управляющих комплексов современных космических аппаратов // Сб. науч. тр. 13-й Молодеж. научно-тех. конф. «Радиолокация и связь — перспективные технологии-2015». М.: Изд-во ПАО «Радиофизика», 2015. С. 23–26.
- [Савкин и др., 2015] *Савкин Л. В., Дмитриев В. Г., Федоров Е. А.* Нейронные сети на базе программируемых логических интегральных схем в бортовой аппаратуре КА // 40-е Академич. чтения по космонавтике, посвящённые памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных — пионеров освоения космического пространства: сб. тез. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. С. 202.
- [Савкин и др., 2016] *Савкин Л. В., Дмитриев В. Г., Федоров Е. А., Филатов В. И., Гусенков П. А.* Нейрорегуляторы в бортовых системах космических аппаратов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2016. № 4. С. 31–39.
- [Хайкин, 2006] *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

- [Gokhale, Graham, 2005] *Gokhale M., Graham P.S.* Reconfigurable Computing — Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays. Springer Publ., 2005. 238 p.
- [Hauck, 2007] *Hauck S.* Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.
- [Himavathi et al., 2007] *Himavathi S., Anitha D.* Muthuramalingam A. Feedforward Neural Network Implementation in FPGA Using Layer Multiplexing for Effective Resource Utilization // IEEE Transactions on Neural Networks. 2007. V. 18. № 3. P. 880–888.
- [Muthuramalingam et al., 2008] *Muthuramalingam A., Himavathi S., Srinivasan E.* Neural Network Implementation Using FPGA: Issues and Application // J. Information and Communication Engineering. 2008. V. 4. P. 6.
- [Omondi et al., 2006] *Omondi A., Rajapakse J., Bajger M.* FPGA Implementations of Neural Networks. Berlin, Germany: Springer, 2006. 360 p.
- [Phatak, 1995] *Phatak D.S.* Complete and Partial Fault Tolerance of Feedforward Neural Nets // IEEE Transactions on Neural Networks. 1995. V. 6/2. P. 446–456.
- [Piuri et al., 1991] *Piuri V., Sami M., Stefanelli R.* Fault tolerance in neural networks: theoretical analysis and simulation results // Advanced Computer Technology, Reliable Systems and Applications. 5th Annual European Computer Conf. Bologna, Italy. 1991. P. 429–436.

MULTI-LAYER PERCEPTRONS IN THE SPACECRAFT ONBOARD SYSTEMS: FPGA-BASED HARDWARE APPROACHES

L. V. Savkin¹, V. G. Dmitryev², E. A. Fedorov^{2,3}

¹ PSC “Radiofizika”

² “Lavochkin Association”

³ Moscow Aviation Institute (MAI)

In operation some practical aspects of the hardware implementation of neural network algorithms of data handling which can be used in spacecraft onboard systems including of the onboard control complexes are considered. The main emphasis in operation is placed on use multi-layer the perceptron models of the artificial neural networks realized preferentially on the basis of programmable logic integrated circuits of the FPGA class. The main results of researches on the multi-layer perceptron hardware implementation for the solution of tasks of the spacecraft onboard information processing the who are brought together to tasks of recognition and classification are shortly explained.

Keywords: programmable logic integrated circuit, artificial neural network, multi-layer perceptron, recognition, classification.

Savkin Leonid Vasilyevich — expert, applicant PhD, leo-san-86@mail.ru

Dmitryev Victor Gennadyevich — circuit designer, applicant PhD

Fedorov Evgeniy Anatolyevich — programmer, post-graduate student

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОПЕРЕМЕННЫХ ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Д. В. Сербинов, Н. П. Семена

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

В настоящее время на Международной космической станции (МКС) планируются научные эксперименты с использованием приборов, отдельные элементы которых требуют очень точной стабилизации температуры. Сложность такой стабилизации заключается в том, что внешние тепловые условия на поверхности МКС являются сильно переменными. Данную переменность вызывает изменяемое во времени прямое и отражённое от конструкции МКС и от Земли солнечное излучение, а также инфракрасное (ИК) излучение от периодически нагреваемой и охлаждаемой поверхности МКС.

Подобная задача возникла для термостабилизации детекторов рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН, температура которых должна быть на уровне -30 ± 2 °С.

Для стабилизации температуры этих детекторов была разработана принципиально новая система обеспечения теплового режима (СОТР) на основе двух связанных друг с другом оппозитно расположенных радиаторов, нагревателя и термоэлектрического модуля. Проведённые термовакуумные испытания рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН показали высокую эффективность такой СОТР.

Ключевые слова: тепловой режим приборов в космосе, термостабилизация приборов на МКС, система обеспечения теплового режима космических устройств, рентгеновский монитор всего неба.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значимые научные результаты в области космических исследований могут быть получены только с помощью приборов, созданных на основе самых современных технологий. Однако характеристики многих современных приборов зависят от условий, создаваемых для их функционирования. Одним из главных таких условий является поддержание их высокостабильной температуры на требуемом уровне. В отдельных случаях это является определяющим фактором для выбора орбиты космических миссий. В частности, для полёта российско-немецкой астрофизической обсерватории «Спектр-РГ», запуск которой планируется в 2017 г., выбрана точка либрации L2 исходя из возможности поддержания требуемой стабильной температуры зеркал и детекторов телескопов eRosita и ART-XC [Semena et al., 2014].

Сильно переменные тепловые условия на внешней поверхности Международной космической станции (МКС) являются серьёзным препятствием для реализации на МКС по-настоящему значимых научных экспериментов. Решение вопросов термостабилизации научных приборов позволит сделать МКС более привлекательным местом для космических исследований, поскольку её орбита размещена в зоне с низким радиационным фоном под

Сербинов Дмитрий Владимирович — ведущий конструктор, serbinov@iki.rssi.ru

Семена Николай Петрович — заведующий лабораторией, кандидат технических наук

радиационными поясами, и при этом для научной аппаратуры имеется необходимый набор служебных систем, создание которого для автономного космического аппарата требует значительных ресурсов и продолжительного времени.

В 2018 г. на МКС планируется начать космический эксперимент «Монитор всего неба» (КЭ МВН) по высокоточному измерению спектра космического рентгеновского фона (КРФ) в диапазоне энергий от 6 до 70 кэВ [Revnitvsev, 2014; Revnitvsev et al., 2012]. Данная задача требует стабильных высоких спектрометрических характеристик регистрирующих КРФ рентгеновских детекторов, которые могут быть получены только при термостабилизации детекторов на заданном температурном уровне в течение трёх лет, за которые предполагается накопить необходимую статистическую информацию.

Для КЭ МВН был создан рентгеновский монитор всего неба СПИН-Х1-МВН, содержащий четыре рентгеновских детектора на основе кристалла CdTe. Для поддержания температуры этих детекторов в МВН впервые будет апробирован метод термостабилизации посредством применения оппозитных радиаторов [Семена, Коновалов, 2007].

В статье представлено теоретическое обоснование применённого метода термостабилизации, описана СОТР МВН, созданная на базе данного метода и приведены полученные экспериментально характеристики данной СОТР.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ КОСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Типовые температурные диапазоны функционирования различного оборудования космических аппаратов (КА) достаточно широкие:

- конструкция ± 100 °С;
- электроника от -15 до $+50$ °С;
- аккумуляторные батареи от 0 до 20 °С;
- электроприводы, маховики, гироскопы от 0 до 50 °С.

Однако существует оборудование КА, требующее поддержания температуры на уровне $\pm 0,1 \dots 5$ °С [Разработка..., 2015; Чеботарев, Косенко, 2011]. К такому оборудованию относятся прецизионные конструкции, например, термостабилизированные платформы орбитальных телескопов, а также электроника полупроводниковых детекторов, бортовые стандарты частоты и различные оптические приборы.

В рентгеновском мониторе СПИН-Х1-МВН вся аппаратура, кроме детекторов, может функционировать при температуре от -10 до $+50$ °С. Однако максимальная надёжность аппаратуры достигается при температуре около 20 °С.

Детекторы должны функционировать в другом температурном диапазоне. Приемлемый уровень утечек и шумов в CdTe детекторе может быть достигнут только при его охлаждении до температуры около -30 °С, что позволяет поднять удельное сопротивление до величины, при которой токи утечки и шумы находятся на приемлемом уровне. При этом для предотвращения ухудшения энергетического разрешения детектора из-за дрейфа коэффициента преобразования (заряд-код аналого-цифрового преобразователя) необходима стабилизация его температуры в диапазоне ± 2 °С [Акимов и др., 1989].

Таким образом, в МВН должны быть выделены две температурные зоны: первая, условно названная «холодной», включает детекторы, вторая — «нетермостабилизируемая» — всю остальную аппаратуру. Температурный диапазон «холодной» зоны должен составлять -30 ± 2 °С; температура элементов нетермостабилизируемой зоны должна находиться в диапазоне 20 ± 30 °С. Дополнительную сложность в разделение МВН на разноуровневые температурные зоны вносит то, что элементы холодной зоны окружены элементами так называемой «тёплой» зоны.

ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ РАЗМЕЩЁННОЙ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ АППАРАТУРЫ И ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ

При установке научной аппаратуры на универсальном рабочем месте (УРМ) внешней поверхности МКС возникают две основные проблемы обеспечения её температурного режима. Первая проблема заключается в неподдерживаемой температуре посадочных мест аппаратуры. Диапазон колебаний этой температуры составляет от -150 до $+150$ °С. Вторая проблема заключается в чрезвычайно высокой неравномерности большинства составляющих внешнего лучистого потока:

- прямого излучения от Солнца;
- отражённого от Земли солнечного излучения;
- отражённого от окружающей конструкции солнечного излучения;
- теплового потока от Земли;
- теплового потока от окружающей конструкции.

Таким образом, для аппаратуры, размещённой на УРМ МКС, отсутствуют две основные возможности стабилизации её температуры: за счёт стабильных тепловых условий на посадочных местах или за счёт ориентации излучающего генерируемый аппаратурой тепловой поток радиатора в зону со стабильными тепловыми условиями.

Единственный способ решения проблемы сильно переменной температуры посадочных мест — установка между аппаратурой и посадочными местами теплоизолирующих проставок.

Проблема переменных тепловых потоков должна решаться различными способами при различных требованиях к уровню и стабильности температуры аппаратуры. Стандартные требования, предусматривающие допустимость колебаний её температуры в диапазоне несколько десятков градусов, при массе аппаратуры больше нескольких килограмм, будут выполняться без дополнительных мер за счёт её теплоёмкости, которой достаточно для сглаживания колебаний температуры при воздействии переменных внешних тепловых условий за непродолжительный орбитальный период МКС, составляющий около 93 мин.

Однако для аппаратуры, в которой требуется поддержание высокостабильной температуры, необходима компенсация переменного поглощённого потока активным элементом, в качестве которого может выступать нагреватель. В этом случае, переменное тепловыделение нагревателя будет дополнять

переменный поглощённый радиаторами поток до постоянного уровня, что обеспечит поддержание постоянной температуры аппаратуры.

Стабилизацию температуры аппаратуры на низком уровне можно также осуществить с помощью термоэлектрического охладителя. При этом за счёт повышения температуры пассивной части СОТР снижается её восприимчивость к неравномерности внешних лучистых потоков, но при этом возникают трудности управления охладителем при совместном использовании с радиатором-излучателем, облучаемым переменным тепловым потоком, из-за появления в такой системе сложной обратной связи [Семена, 2013].

В реальной СОТР обычно имеется запаздывание реакции датчиков температуры на активные воздействия нагревателей или охладителей. Из-за данной инерционности эффективное управление активной частью СОТР, обеспечивающее стабильность температуры объекта терморегулирования в условиях переменных тепловых факторов космического пространства возможно при ограничении на определённом уровне амплитуды и скорости изменения температуры пассивной части СОТР — радиатора. Для сглаживания переменности температуры радиатора, вызываемой переменностью внешних лучистых потоков, могут быть использованы два способа — применение теплового аккумулятора или замена одного радиатора несколькими разноориентированными радиаторами [Семена, Коновалов, 2007]. Тепловые аккумуляторы в научной аппаратуре практически не используются из-за сложности их интеграции в прибор и значительных материальных и временных затратах, необходимых на их создание и отработку.

Применение разноориентированных радиаторов является значительно более простым способом по сравнению с использованием теплового аккумулятора. Оно основано на выравнивании суммарного поглощённого теплового потока за счёт сдвига фазы переменных потоков, поглощаемых различно ориентированными радиаторами при их повороте относительно внешнего источника тепла.

Для оценки возможности использования этого способа была решена оптимизационная задача по минимизации колебания температур объекта 5 (рис. 1), установленного на УРМ МКС и имеющего четыре поверхности внешнего радиационного теплообмена 1–4. Из внешнего радиационного теплообмена объекта были исключены нижняя поверхность, которая заведомо будет экранироваться элементами УРМ и направленная на МКС поверхность, экранируемая корпусом МКС.

Задачей оптимизации являлось определение такого соотношения площадей поверхностей внешнего теплообмена данного объекта, при котором колебания его температуры были бы минимальны.

В качестве расчётных случаев были выбраны три ориентации орбиты МКС относительно Солнца, на которых реализуются экстремумы всех внешних лучистых потоков — при направлении на Солнце, лежащим в плоскости орбиты ($\psi_s = 0^\circ$) и при максимально достижимых углах между плоскостью орбиты и направлением на Солнце ($\psi_s = \pm 75^\circ$).

Для оптимизации была использована математическая тепловая узловая модель рассматриваемого объекта [Семена, 2014], включающая пять узлов, соответствующих четырём поверхностям внешнего теплообмена и связывающему их центральному элементу:

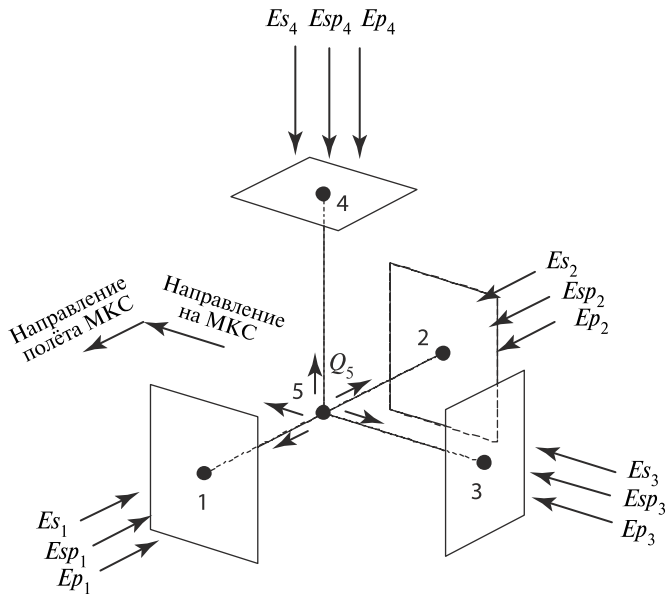


Рис. 1. Оптимизационная тепловая модель объекта на УРМ МКС

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} C_i &= \left(As_i (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau)) + \varepsilon_i Ep_i(\tau) \right) F_i - \frac{T_i(\tau) - T_5(\tau)}{R_{i-5}} - \varepsilon_i \sigma T_i^4(\tau) F_i; \\ \frac{dT_5(\tau)}{d\tau} C_5 &= Q_5 - \sum_{i=1}^4 \frac{T_5(\tau) - T_i(\tau)}{R_{i-5}}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где i — индекс, соответствующий номеру теплового узла ($i = 1 \dots 4$); $T_i(\tau)$ — температура i -го теплового узла ($i = 1 \dots 5$); C_i — теплоёмкость i -го теплового узла ($i = 1 \dots 5$); τ — время; As_i , ε_i , F_i — поглощательная способность солнечного излучения, степень черноты в ИК-области и площадь поверхности внешнего теплообмена i -го теплового узла ($i = 1 \dots 4$); $Es_i(\tau)$, $Esp_i(\tau)$, $Ep_i(\tau)$ — облучённости прямым солнечным излучением, отражённым от Земли солнечным излучением и собственным излучением Земли поверхности внешнего теплообмена i -го теплового узла ($i = 1 \dots 4$); R_{i-5} — тепловое сопротивление между i -м ($i = 1 \dots 4$) и 5-м тепловыми узлами; Q_5 — тепловыделение центрального теплового узла; σ — постоянная Стефана–Больцмана.

Для повышения чувствительности модели к воздействию внешних лучистых потоков в ней были уменьшены до нуля параметры C_i , R_{i-5} , Q_5 , сглаживающие колебания температуры, вызываемые переменными внешними воздействиями.

Если для представления площадей внешнего теплообмена использовать коэффициенты k_i их долей в суммарной площади всей поверхности: $F_i = k_i(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$, где $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1$, то при одинаковом покрытии всех внешних поверхностей ($As_i = As$, $\varepsilon_i = \varepsilon$) с учётом того, что при нулевых тепловых сопротивлениях между узлами весь объект будет изотермичен ($T_i(\tau) = T(\tau)$), оптимизационная модель примет следующий вид:

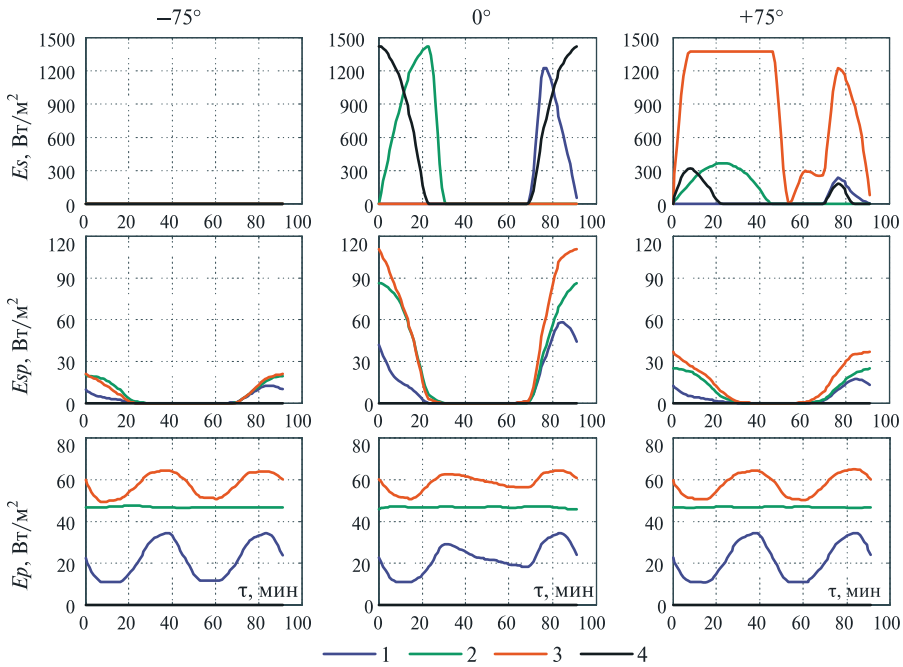


Рис. 2. Внешние лучистые потоки на УРМ МКС

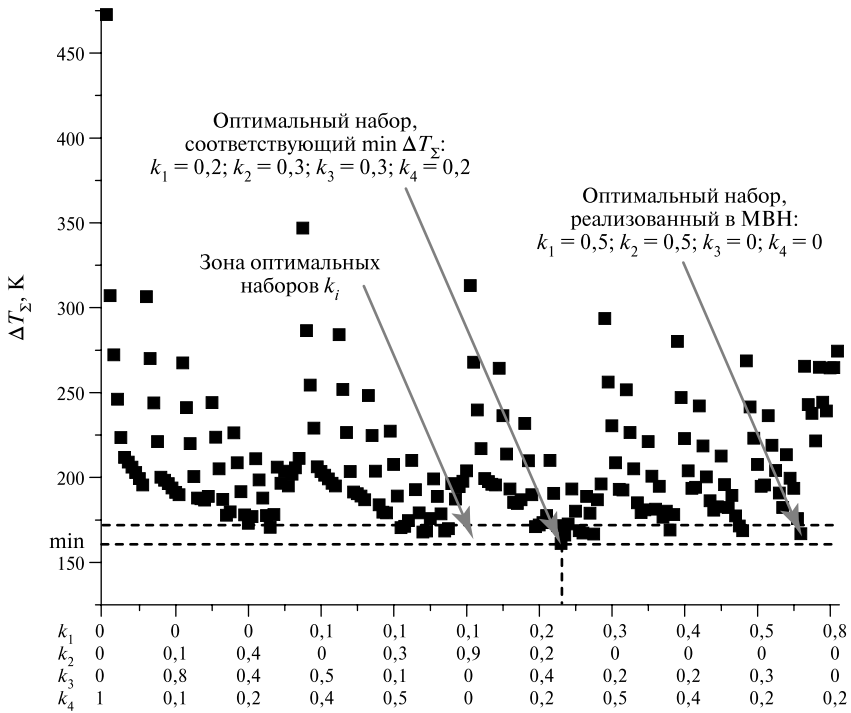


Рис. 3. Зависимость критерия ΔT_{Σ} от соотношения площадей разноориентированных поверхностей внешнего теплообмена для объекта на УРМ МКС

$$\sum_{i=1}^4 \left(A_{S_i} \left(E_{S_i}(\tau) + E_{SP_i}(\tau) \right) + \varepsilon E_{P_i}(\tau) \right) k_i = \varepsilon \sigma T^4(\tau).$$

Критерием колебаний температуры объекта, вызываемых переменностью внешних лучистых потоков, в течение всего полёта МКС, может служить минимум суммы максимальной и средней неравномерности температуры объекта на трёх граничных орбитах:

$$\Delta T_{\Sigma} = \Delta T_{MAX} + \Delta T_{AV}.$$

Соотношение площадей поверхностей внешнего теплообмена (набор коэффициентов k_i), соответствующее минимуму этого критерия будет оптимальным для минимизации колебания температуры объекта при всех возможных орбитах МКС. Составляющие этого критерия определяются следующим образом:

$$\Delta T_{MAX} = \max(\Delta T_0, \Delta T_{+75}, \Delta T_{-75});$$

$$\Delta T_{AV} = \frac{\Delta T_0 + \Delta T_{+75} + \Delta T_{-75}}{3},$$

где $\Delta T_0 = (T_{MAX} - T_{MIN})_0$, $\Delta T_{+75} = (T_{MAX} - T_{MIN})_{+75}$, $\Delta T_{-75} = (T_{MAX} - T_{MIN})_{-75}$ — максимальные амплитуды колебания температуры объекта при трёх граничных ориентациях орбиты МКС при одном наборе k_i .

Данный метод был использован для УРМ, на котором планируется установить МВН. Облучённости лучистыми потоками четырёх внешних поверхностей рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН на УРМ за один орбитальный период МКС для трёх её граничных орбит показаны на рис. 2.

На основании данных зависимостей был рассчитан критерий колебания температуры ΔT_{Σ} объекта для разных соотношений площадей поверхностей внешнего теплообмена, имеющих типичные для радиаторов космических устройств оптические характеристики: $A_{S_i} = 0,3$; $\varepsilon_i = 0,9$. На рис. 3 приведены значения этого критерия для различных наборов коэффициентов k_i .

Как видно на рис. 3, минимум критерия ΔT_{Σ} , соответствующий минимальному колебанию температуры объекта, реализуется при соотношении площадей поверхностей 1, 2, 3 и 4 равном $0,2 \times 0,3 \times 0,3 \times 0,2$. Однако при этом может быть выделено несколько вариантов коэффициентов k_i , которые позволили бы получить значение критерия ΔT_{Σ} , близкое к минимальному. Поэтому была выделена зона оптимальных наборов k_i , которые могут быть использованы для формирования пассивного уровня СОТР прибора, устанавливаемого на УРМ.

СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ МОНИТОРА ВСЕГО НЕБА НА БАЗЕ ДВУХ ОППОЗИТНЫХ РАДИАТОРОВ

Исходя из жёстких требований к термостабилизации детекторов, для МВН была создана СОТР с использованием новых схемных решений, состоящая из внешнего пассивного уровня и двух внутренних активных уровней (рис. 4).

Внешний пассивный уровень СОТР был сформирован на основании результатов оптимизации, представленных в предыдущей части статьи и конструктивных особенностей МВН.

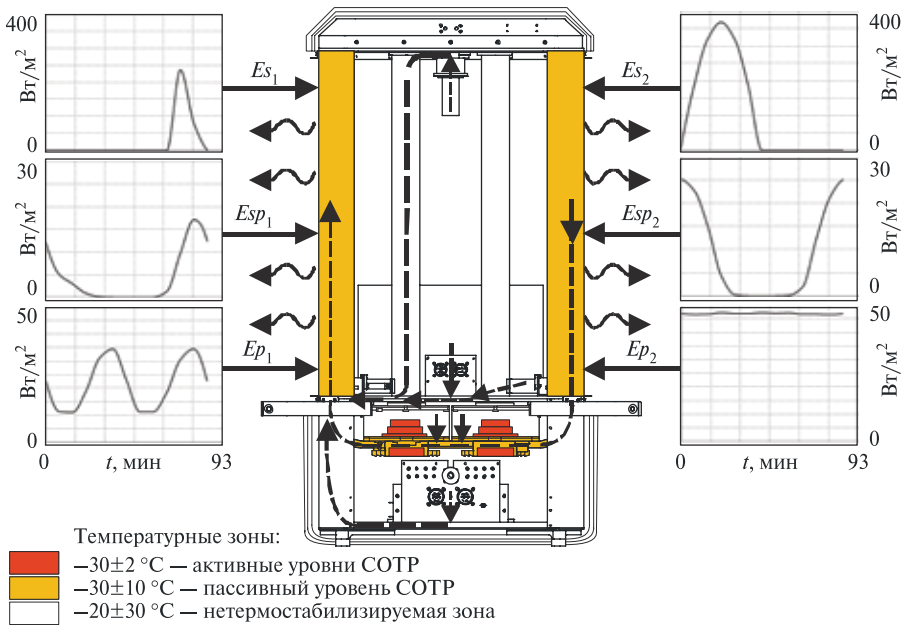


Рис. 4. Схема СОР МВН

Для пассивного уровня СОР МВН был выбран один из оптимальных наборов коэффициентов k_i ($k_1 = 0,5$; $k_2 = 0,5$; $k_3 = 0$; $k_4 = 0$; см. рис. 3), который соответствует двум оппозитным радиатором, нормали к которым направлены по направлению полёта МКС и против него. Площадь радиаторов была определена исходя из условия минимального отклонения от требуемой для детектора температуры на тёплой ($\psi_s = +75^\circ$), на которой средний поглощённый радиаторами тепловой поток имеет максимальный уровень, и на холодной ($\psi_s = -75^\circ$), на которой этот уровень минимален. Для радиаторов со стандартным терморегулирующим покрытием ЭКОМ-1 ($A_s = 0,3$; $\epsilon = 0,9$) расчётная площадь составила по $0,1297 \text{ м}^2$ для каждого радиатора.

Кондуктивную тепловую связь внешнего пассивного уровня СОР с внутренними активными обеспечивают две тепловые U-образные трубы, на полке каждой из которых установлены по два детекторных модуля. При этом тепловое сопротивление между пассивным и активными уровнями СОР составляет $0,4 \text{ К/Вт}$.

Для определения эффективности применения двухрадиаторной схемы было проведено моделирование колебания температуры на входе в активный уровень СОР МВН за один орбитальный период для двух случаев — для выбранной конфигурации СОР ($k_1 = 0,5$; $k_2 = 0,5$; $k_3 = 0$; $k_4 = 0$) и для однорадиаторной системы ($k_1 = 1$; $k_2 = 0$; $k_3 = 0$; $k_4 = 0$). При моделировании была использована узловая тепловая модель (1), в которой учитывались реальные тепловые сопротивления и теплоёмкости узлов в предположении постоянного тепловыделения центрального теплового узла $Q_5 = \text{const}$. Результаты моделирования показали, что колебание температуры на входе в активные уровни СОР снижается в два раза при использовании двух оппозитных радиаторов по сравнению с однорадиаторной системой (рис. 5).

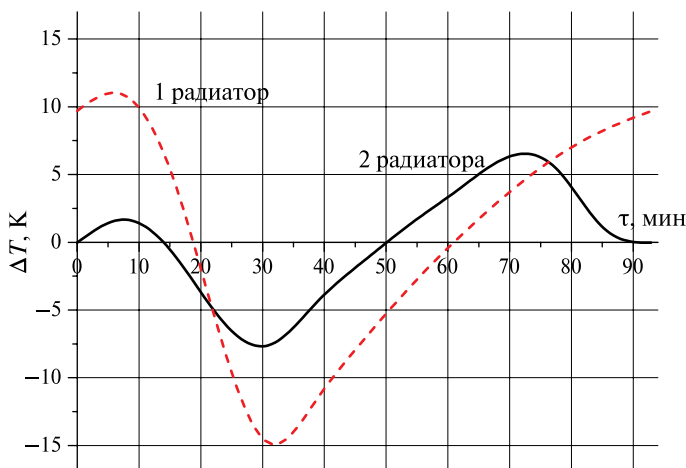


Рис. 5. Отклонение температуры на выходе пассивного уровня СОТР объекта, размещённого на УРМ МКС при использовании одного и двух радиаторов в течение одного орбитального периода



Рис. 6. СПИН-Х1-МВН перед установкой в термовакуумную камеру

Условие обеспечения минимального отклонения температуры термостабилизруемой зоны от требуемой температуры с помощью пассивного уровня СОТР привело к тому, что на холодных орбитах МКС температура на выходе пассивного уровня СОТР ниже требуемой, на тёплых — выше. Таким образом, для того, чтобы повысить температуру детектора на холодных орбитах и снизить её на тёплых до требуемого постоянного уровня в СОТР МВН были введены два активных уровня — нагревательный и охлаждающий. В качестве активных элементов для этих уровней используются нагреватели и термоэлектрические преобразователи.

Для подтверждения разработанной концепции СОТР был проведён тепловой эксперимент в условиях, имитирующих тепловые факторы космического пространства и воздействия внешних лучистых потоков на радиаторы МВН на холодной и тёплой орбите.

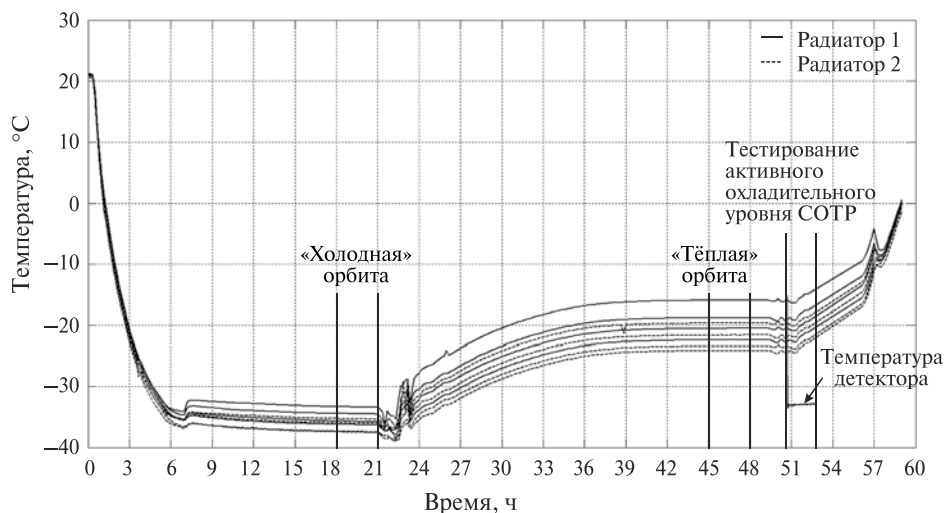


Рис. 7. Результаты термовакuumных испытаний МВН

Эксперимент был проведён в 2,5-кубовой термовакuumной камере с азотными криогенными экранами (рис. 6).

Для воспроизведения воздействия внешних тепловых потоков на радиаторы МВН на тёплой и холодной орбитах МКС был использован кондуктивный имитатор усреднённых поглощённых тепловых потоков (ИПТП). Поддержание температуры посадочных мест МВН осуществлялось с помощью имитатора посадочных мест (ИПМ). Для учёта влияния отличия температуры азотных криоэкранов от радиационной температуры космического пространства сонаправлено с радиаторами были установлены измерители окружающей радиационной температуры (ИРТ).

Результаты проведённого эксперимента представлены на рис. 7.

Анализ этого эксперимента показал, что пассивный уровень СОТР МВН находился в прогнозируемых температурных диапазонах на режимах, имитирующих холодную и тёплую орбиту. Отклонение от требуемой температуры на выходе пассивного уровня СОТР составило 7 °C при имитации условий холодной орбиты и 5 °C — для условий тёплой орбиты. Данное отклонение было меньше компенсирующей способности активных уровней СОТР. Смещение температуры радиаторов в тёплую зону было вызвано более высокой по сравнению с космическим пространством радиационной температурой криогенных экранов, которая по результатам измерений ИРТ составила от 158 до 163 К на холодной орбите и от 166 до 171 К на тёплой орбите.

Возможность стабилизации температуры детектора с помощью активного охладительного уровня было проверено на специальном этапе тестирования данного уровня, в котором в течение двух орбитальных периодов имитировалась максимальная разность температур пассивного уровня и объекта термостабилизации (~15...20 °C) и максимальная скорость изменения температуры пассивного уровня СОТР (до ~20 °C/ч). При данных условиях активный охладительный уровень системы позволил стабилизировать температуру детектора на уровне $-32,5 \pm 0,1$ °C, что значительно выше поставленных требований.

ЛИТЕРАТУРА

- [Акимов и др., 1989] *Акимов Ю. А., Игнатьев О. В., Калинин А. И., Кушнирук В. Ф.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Под ред. Ю. А. Акимова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.
- [Разработка..., 2015] Разработка систем космических аппаратов / Под ред. П. Форте-скую, Дж. Старка, Г. Суинерда. Пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2015. 764 с.
- [Семена, 2013] *Семена Н. П.* Особенности использования термоэлектрических преобразователей в системах терморегулирования космического применения // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 2. С. 213–224.
- [Семена, 2014] *Семена Н. П.* Использование масштабных моделей в наземных экспериментах, воспроизводящих теплообмен в условиях космического пространства // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 1. С. 47–58.
- [Семена, Коновалов, 2007] *Семена Н. П., Коновалов А. А.* Методы создания механизмов саморегулирования пассивных систем обеспечения теплового режима устройств космического применения // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 1. С. 87–98.
- [Чеботарев, Косенко, 2011] *Чеботарев В. Е., Косенко В. Е.* Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. 488 с.
- [Revnitvsev et al., 2012] *Revnitvsev M., Semena N., Akimov V., Levin V., Serbinov D., Rotin A., Kuznetsova M., Molkov S., Buntov M., Tambov V., Lapshov I., Gurova E., Simonenkov D., Tkachenko A., Pavlinsky M., Markov A., Konoshenko V., Sibirtsev D.* MVN: X-ray monitor of the sky on Russian segment of ISS // Proc. SPIE. V. 8443. Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. 844310. 17 Sept. 2012. doi: 10.1117/12.925916.
- [Revnitvsev, 2014] *Revnitvsev M. G.* Measurements of the Cosmic X-ray Background of the Universe and the MVN Experiment // Astronomy Letters. 2014. V. 40. No. 11. P. 667–690.
- [Semena et al., 2014] *Semena N., Pavlinsky M., Buntov M., Serbinov D., Gurova E., Tambov V., Roiz I., Garin M., Lazarchuk V., Zaytcev A., Martunov V., Shabarchin A., Sokolov A.* ART-XC/SRG: results of thermo-vacuum tests // Proc. SPIE. V. 9144. Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray. 91444T. 25 July 2014. doi: 10.1117/12.2055941.

ТHERMAL STABILIZATION OF SCIENTIFIC EQUIPMENT IN CONDITIONS OF HIGHLY VARIABLE EXTERNAL HEAT FLUXES ON THE SURFACE OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

D. V. Serbinov, N. P. Semena

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

Now scientific experiments using instruments, some elements of which require very precise temperature stabilization are planned on the ISS. The complexity of such stabilization is that the external thermal conditions on the ISS surfaces are highly variable. This variability is caused by time-varying direct and reflected from the ISS design and from the Earth solar radiation and by infrared radiation from the periodically heated and cooled surface of the ISS.

A similar problem arose for thermal stabilization of detectors of x-ray monitor SPIN-X1-MVN, the temperature of the detectors must be at a level of -30 ± 2 °C.

In order to stabilize the temperature of these detectors principally new system of thermal control (TCS) on the basis of two connected together of opposite radiators, heater and a thermoelectric module has been developed. The carried out thermal vacuum tests of the x-ray SPIN-X1-MVN monitor have shown high efficiency of such TCS.

Keywords: the thermal mode of devices in space; thermostabilization of devices on ISS; system of providing the thermal mode of space devices; x-ray monitor of all sky.

Serbinov Dmitry, leading constructor

Semena Nikolay, Candidate of Technical Sciences, head of laboratory

НЕОДНОРОДНОСТЬ В ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЛАКТИК НА $z \approx 0,5$ В НАПРАВЛЕНИИ НА ГАММА-ВСПЛЕСК GRB 021004

*И. В. Соколов^{1,4}, А. Дж. Кастро-Тирадо², О. В. Верходанов³, О. П. Желенкова³,
Ю. В. Барышев⁴*

¹ Терскольский филиал Института астрономии Российской академии наук (ТФ ИНАСАН)

² Институт астрофизики Андалусия, Испанский Национальный исследовательский совет

³ Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН)

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)

В данной работе проверяются признаки наличия неоднородности пространственного распределения галактик в направлении на гамма-всплеск GRB 021004. Первым таким признаком является распределение по фотометрическим красным смещениям с пиком на $z \approx 0,5$, найденным по данным Большого телескопа альт-азимутального (БТА, Архыз) и Hubble Space Telescope (HST, National Aeronautics and Space Administration, NASA). Вторым признаком являются линии поглощения дублета магния MgII 2796,2803 в спектре послесвечения гамма-всплеска GRB 021004 с $z = 0,57$. Третьим признаком является неоднородность температуры микроволнового фона по данным космического телескопа им. Макса Планка. И четвёртым признаком является неоднородность в распределении по спектроскопическим красным смещениям по данным обзора Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS), являющегося частью обзора Sloan Digital Sky Survey III (SDSS-III).

Ключевые слова: скопления галактик, гамма-всплески, многополосная фотометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что измерения поверхностной яркости галактик в скоплениях могут быть использованы для оценки угловых размеров и расстояний до этих объектов [Holanda et al., 2016]. В особенности, определение расстояний до источников нейтрино, сверхновых и гамма-всплесков становится основной наблюдательной задачей для выяснения основных параметров этих объектов.

С другой стороны, известно, что распределение этих объектов по небесной сфере может быть неравномерным. Теперь это становится очевидным, по крайней мере для тех гамма-всплесков, распределение которых коррелирует с неравномерностью микроволнового фона [Khabibullina et al., 2014]. В работе [Balazs et al., 2015] также говорится об аномалиях в пространственном

Соколов Илья Владимирович — младший научный сотрудник, ilia333@land.ru

Кастро-Тирадо Альберто Дж. — профессор

Верходанов Олег Викторович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук

Желенкова Ольга Петровна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Барышев Юрий Викторович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук

распределении гамма-всплесков. Обсуждение возможной неравномерности в распределении источников нейтрино в связи с гамма-всплесками можно увидеть в работе [Fargion, 2014]. Наблюдательные проявления подобных отношений напрямую влияют на изучение источников нейтрино, гамма-всплесков и сверхновых.

Есть загадочная связь между гамма-всплесками и сверхновыми. По крайней мере, длинные гамма-всплески связаны с коллапсом ядра очень массивных звёзд [Balázs et al., 2015; Li, Lin, 2015; Ukwatta, Wozniak, 2015; Yüksel, Kistler, 2012]. Подобно коллапсу ядер сверхновых, в гамма-всплесках коллапс массивных звёздных железных ядер ведёт к образованию компактных объектов (коллапсаров), сопровождающийся высокоскоростным выбросом значительной доли вещества родительской звезды. Коллапс ядра массивной звезды связан с кварковым фазовым переходом в компактных объектах, что ведёт к излучению нейтрино и фотонов в коллапсирующих сверхновых и гамма-всплесках.

С другой стороны, распределение по небесной сфере источников электромагнитного излучения и нейтрино, связанных с коллапсом звёздных ядер, может быть неравномерным [Gomboc, 2012], что может быть связано с неравномерностями в распределении галактик, в которых формирование компактных объектов происходит благодаря эволюции массивных звёзд. Неоднородность в распределении галактик в направлении на гамма-всплески обнаружено и изучается подобным образом, как и для спектроскопии квазаров, во многих работах [Sudilovsky et al., 2013]. Для галактик, дающих вклад в линии поглощения в системы линий спектров гамма-всплесков получены прямые снимки и они напрямую исследуются. Таким образом, возможно попытаться найти избыток плотности в распределении галактик в направлении на гамма-всплески различными методами: с помощью изучения спектров оптического послесвечения гамма-всплесков, фотометрическими методами (получение и фотометрирование глубоких снимков в нескольких цветовых полосах), а также поиск корреляций с температурой микроволнового фона.

1. НЕОДНОРОДНОСТЬ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЛАКТИК В НАПРАВЛЕНИИ НА ГАММА-ВСПЛЕСКИ

Неоднородности в распределении галактик в направлении на гамма-всплески обнаружены и активно изучаются, начиная с работы [Sudilovsky et al., 2013]. Гамма-всплески происходят на космологических расстояниях, с энерговыделением $10^{51} \dots 10^{53}$ эрг, с красными смещениями от $\sim 0,01$ до 10 [Sudilovsky et al., 2013].

Помимо исследования родительских галактик гамма-всплесков, быстрая спектроскопия послесвечений гамма-всплесков позволяет исследовать линии поглощения элементов на луче зрения, подобно тому, как это делалось ранее в случае исследования квазаров. Одна из таких систем линий — это MgII (rest) 2800 Å, которая является достаточно чёткой и несложной для отождествления в спектре со средним отношением сигнал/шум. Используя большую выборку спектров послесвечений гамма-всплесков, был обнаружен [Prochter et al., 2006; Vergani et al., 2009] избыток плотности (с фактором 2-4) систем абсорбционных линий MgII на луче зрения. Если этот избыток плотности явля-

ется действительным следствием наличия вещества на этих красных смещениях, то должно быть возможным обнаружить избыток галактик в поле в направлении на гамма-всплеск, хотя предварительное изучение снимков и не обнаружило явно выраженных скоплений галактик. Более того, было сделано предложение, что большинство кратковременных гамма-всплесков в галактиках ранних типов происходит в галактических кластерах и три таких соотношения уже были обнаружены [Shin, Berger, 2007]. Хотя авторы работы [Sudilovsky et al., 2013] заинтересованы, в основном, в поиске избытка плотности галактик поля на луче зрения, и, в связи с этой задачей авторы сделали хороший (на 2013 г.) обзор спектроскопических данных 73 послесвечений гамма-всплесков. Перекрывающиеся абсорбционные линии для послесвечений гамма-всплесков могут быть обнаружены подобным способом, который применяется и для спектроскопии квазаров. Одной из систем линий поглощения является MgII, которые легко обнаруживаются в спектрах со средним отношением сигнал/шум на $\lambda \approx 2800$ (дублет MgII 2796,2803). Так как сильные линии дублета MgII могут выявлять галактики на луче зрения, мы будем использовать данные спектроскопии в нашем фотометрическом исследовании галактик поля в направлении на гамма-всплеск GRB 021004.

Одна из таких площадок GRB 000926 (табл. 1) уже была исследована и результаты были опубликованы [Fatkhullin et al., 2004]. В этой работе представлены результаты обработки наблюдений поля размером $3,6 \times 3'$, центрированным на родительскую галактику GRB 000926 ($J2000.0 = 17^h 04^m 11^s$, $J2000.0 = +51^\circ 4' 9,8''$). Эти наблюдения были проведены на шестиметровом телескопе CAO с помощью редуктора светосилы SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations). Каталог обнаруженных объектов содержит 264 объекта с отношением сигнал/шум более пяти в каждой из фотометрических полос. Предельными звёздными величинами для обнаруженных объектов являются: 26.6(B), 25.7(V), 25.8(R_c), 24.5(I_c). Дифференциальные подсчёты галактик находятся в хорошем согласии с предыдущими и опубликованными работами по наблюдению глубоких полей. Авторы оценили фотометрическое красное смещение для всех объектов каталога и изучили изменения показателей цвета для галактик с измеренным красным смещением. Для ярких спиральных галактик с $M(B) < 18$, авторы не нашли сколь-нибудь заметной эволюции линейных размеров галактик до $z \approx 1$.

Таблица 1. Глубокие поля БТА

GRB	Filters	FWHM	T_{exp} , s
GRB 970508	BVRI	1".3	600×7, 500×4, 600×5, 400×5
GRB 971214	VR	1".2	600×1, 600×1
GRB 980613	BVRI	1".3	700×1, 600×1, 600×3
GRB 980703	BVRI	1".3	480×1, 320×1, 300×1, 360×1
GRB 990123	BVRI	1".5	600×1, 600×1, 600×1, 600×1
GRB 991208	BVRI	2".1	300×6, 300×5, 180×7, 180×2
GRB 000926	BVRI	1".3	500×5, 300×5, 180×25, 120×15
GRB 021004	BVRI	1".5	600×6, 450×13, 180×15, 120×14

Наблюдательные данные БТА являются основой для наших исследований. При исследовании данных других глубоких полей (см. табл. 1), они были дополнены данными, полученными на других инструментах. Одна из целей данной работы — выяснить, какие предельные результаты можно получить при помощи шестиметрового телескопа в интересной и актуальной области исследований, дополнив их данным с других инструментов.

2. МЕТОДИКА ФОТОМЕТРИРОВАНИЯ ГЛУБОКОГО ПОЛЯ GRB 021004

В работе были использованы данные наблюдений глубокого поля GRB 021004, полученные в рамках программы наблюдений оптических гамма-всплесков на БТА [Baryshev et al., 2010]. Суммарное время экспозиции в каждом из фильтров (BVRI) составляет около одного часа. Для выделения объектов из суммарного по всем фотометрическим полосам кадра использовался программный пакет SExtractor [Bertin, Arnouts, 1996]. Каталог объектов, выделенных из кадра, размерами $4 \times 4'$, содержит 935 объектов, с соотношением сигнал/шум более 3. Достиженные предельные звёздные величины составляют 26.9(B), 27.2(V), 26.0(R_c), 25.5(I_c). Полученные результаты сравнивались с результатами фотометрии данных, полученных на Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys (HST ACS) (рис. 1).

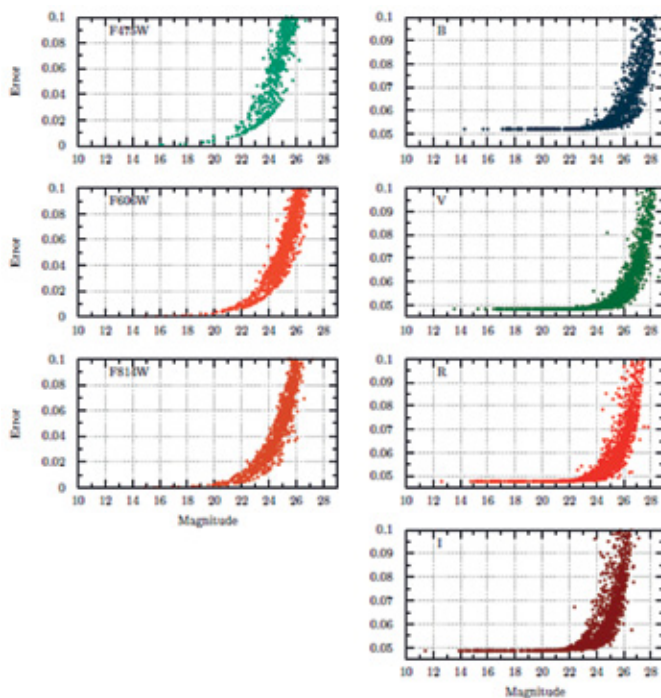


Рис. 1. Диаграммы «звёздная величина — ошибка» для объектов, обнаруженных в поле гамма-всплеска GRB 021004. Количество обнаруженных объектов — 935. В левой колонке — данные, полученные на HST ACS, в фильтрах F475W, F606W и F814W. В правой колонке — данные для тех же объектов для данных БТА в фильтрах B, V, R_c , I_c .

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ КРАСНЫЕ СМЕЩЕНИЯ ГАЛАКТИК ПОЛЯ GRB 021004

Фотометрические красные смещения, как правило, обладают меньшей точностью, чем красные смещения, определяемые по данным спектроскопии. Тем не менее, для статистических исследований, такой точности вполне достаточно. Кроме того, для фотометрических исследований есть возможность сделать оценку красных смещений для более слабых объектов, получить спектры которых не представляется возможным. Основная идея оценки красных смещений по данным фотометрии очень проста: фотометрические измерения в нескольких цветовых полосах могут рассматриваться как спектр низкого разрешения, который можно использовать для оценки красного смещения [Baum, 1962] (рис. 2).

В данной работе для этих целей был использован программный пакет HyperZ [Bolzonella et al., 2000]. В качестве входных данных были: видимые звёздные величины объектов в четырёх фильтрах, ошибки их определения, внутренний закон поглощения для галактик (в данной работе мы использовали закон Калзетти [Calzetti et al., 2000]) для галактик со звездообразованием, который широко используется в аналогичных работах), а также диапазон красных смещений, в которых происходит поиск решения (мы использовали диапазон z от 0 до 4, так как для больших z из-за сильного сдвига спектра в красную область, данных только лишь фильтров видимого диапазона становится недостаточно. Метод основан на нахождении лучшего соответствия данных фотометрических наблюдений и шаблонных спектров для различных типов галактик (рис. 3), поэтому решающим фактором является выбор шаблонных спектров. Для десяти ярких галактик поля мы находим, что определённые для них шаблонные спектры и типы галактик находятся в хорошем согласии с данными HST, которые, благодаря хорошему угловому разрешению снимков, выявляют структуру этих галактик (рис. 4).

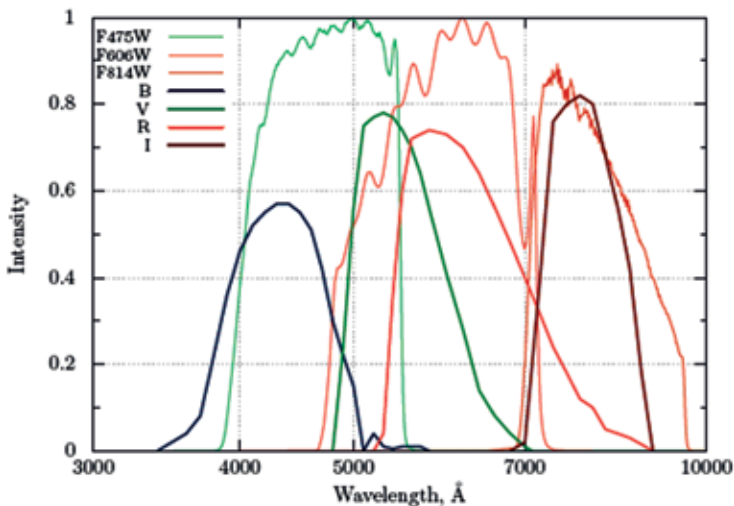


Рис 2. Кривые пропускания фильтров в оптическом диапазоне HST ACS и БТА BVR_cI_c.

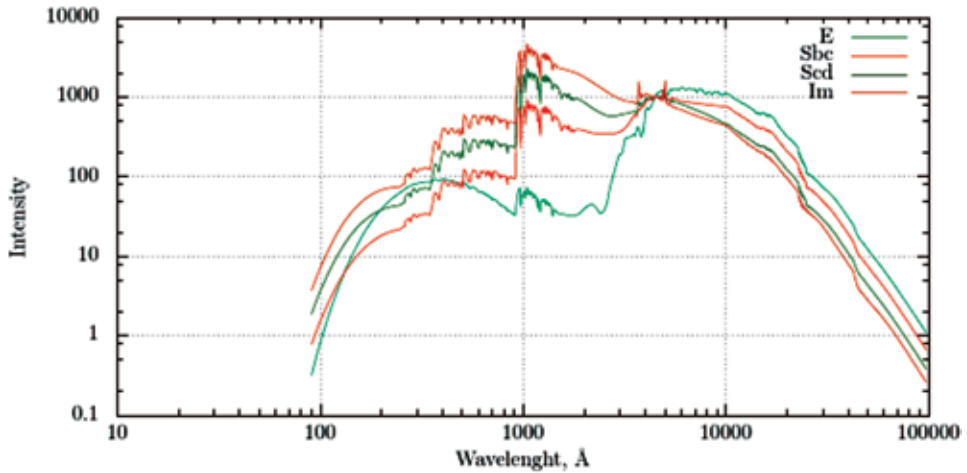


Рис. 3. Шаблонные спектры различных типов галактик, используемых для оценки фотометрического красного смещения в пакете HyperZ

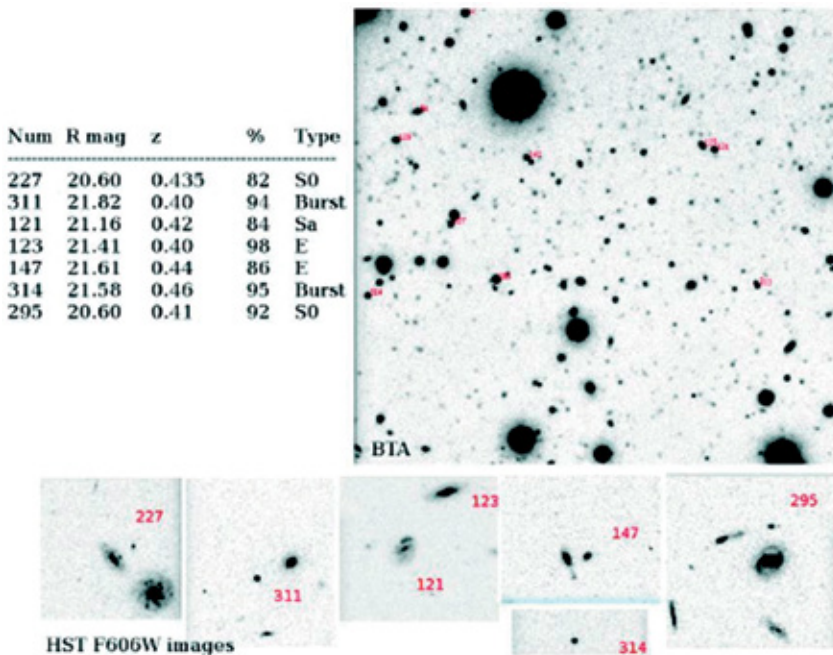


Рис 4. Справа сверху — поле гамма-всплеска GRB 021004, сумма кадров во всех фильтрах. Нижний ряд — изображения из кадров HST ACS. В таблице указаны типы и красные смещения для ярких галактик

Данная площадка также содержит четыре рентгеновских источника, взятых из каталога источников Chandra, для которых мы также произвели оценку красного смещения (рис. 5). Для пространственного распределения галактик мы находим крупную неоднородность на $z \approx 0,5$ (рис. 6, 7).

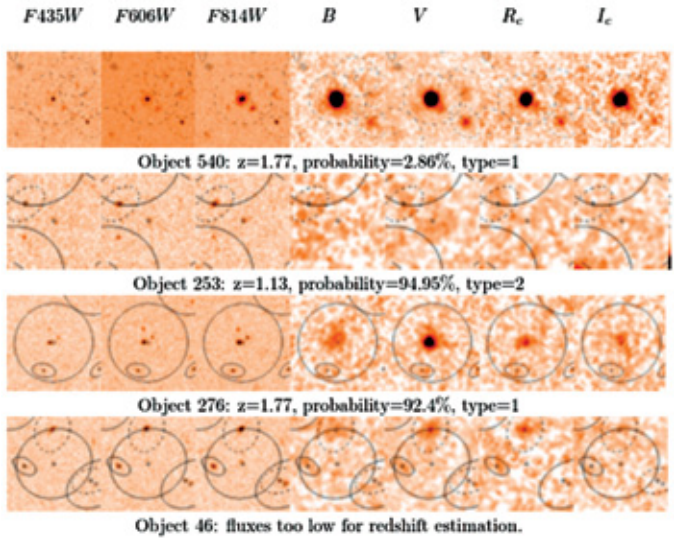


Рис 5. Рентгеновские источники в поле гамма-всплеска GRB 021004. Первые три изображения получены в оптических фильтрах HST ACS. Четыре следующих — изображения БТА BVR_cI_c . Номера объектов из каталога обнаруженных объектов в данном поле

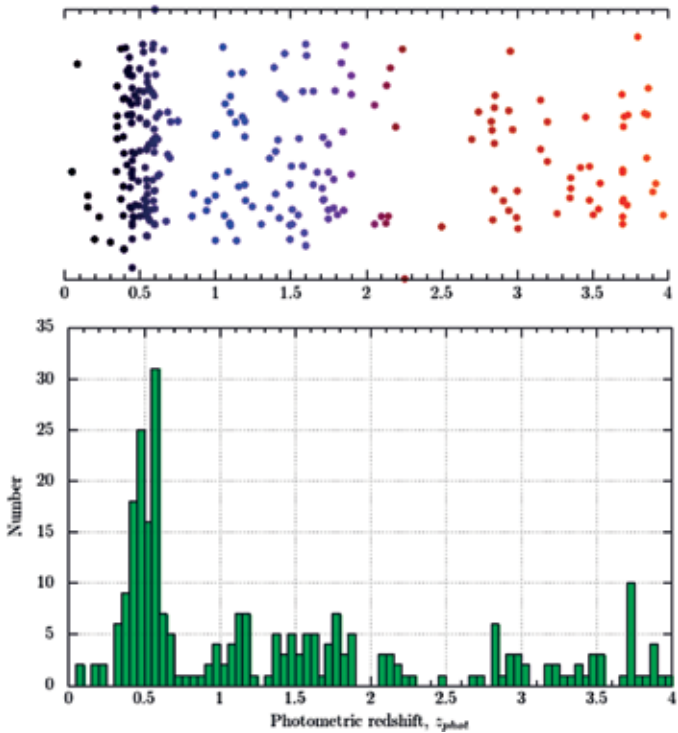


Рис 6. Пространственное распределение объектов (вверху). Вдоль вертикальной оси откладывается координата объекта в кадре. Гистограмма распределения объектов (внизу) с хорошо различимым пиком на $z \approx 0,5$. Данные БТА

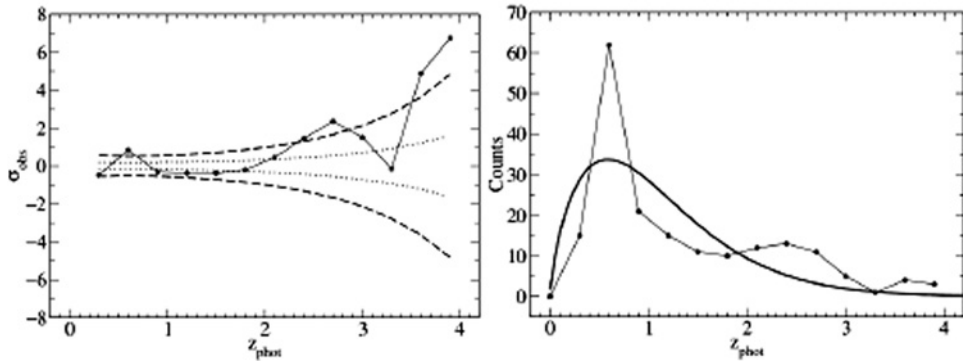


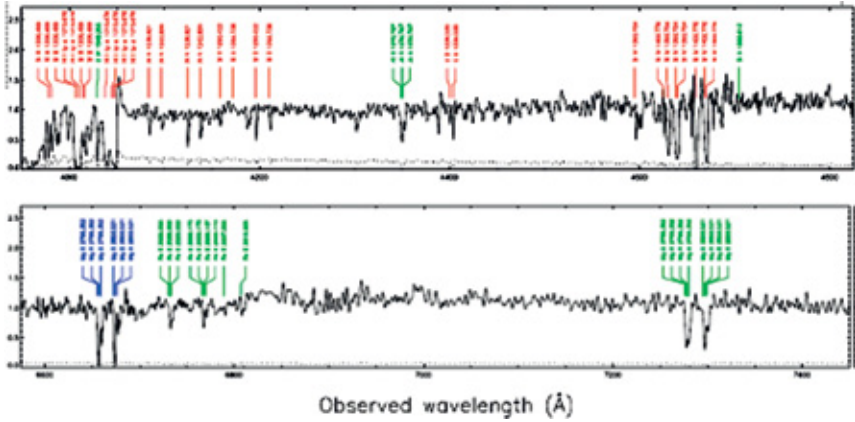
Рис. 7. Отклонение и пуассоновский шум для $dz = 0,3$

Также для гамма-всплеска GRB 021004 был измерен спектр оптического послесвечения. В этом спектре отождествлены линии дублета MgII 2796/2803 с красными смещениями $z = 1,3820$ и $z = 1,6020$ (рис. 8). Также в спектре есть две особенности, которые могут быть отождествлены как линии дублета MgII с красным смещением $z = 0,57$ (рис. 9, табл. 2) [Vergani et al., 2009].

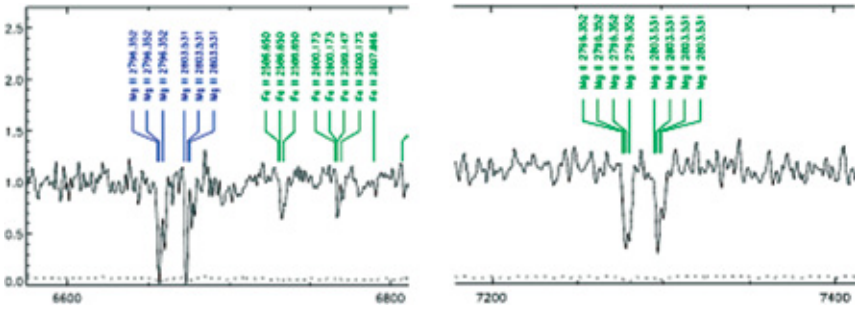
На небольшом угловом расстоянии (около 1°) рядом с полем гамма-всплеска GRB 021004 также имеются два галактических кластера на $z \approx 0,5$. Мы исследовали область размером $3 \times 3^\circ$, включающую все три площадки, используя данные SDSS DR12 (Sloan Digital Sky Survey). Предельные звёздные величины для объектов каталога SDSS DR12 около 22, также каталог включает в себя оценку красного смещения по фотометрическим данным, и по спектроскопии для наиболее ярких объектов. Площадку $3 \times 3^\circ$ мы разбили на четыре области, и распределение по красным смещениям для этих областей также имеет пик на $z \approx 0,5$ (рис. 10). Данные по микроволновому фону, полученные с телескопа института М. Планка для площадки $3 \times 3^\circ$, имеют неоднородности по полю, что может быть результатом проявления эффекта Сюняева-Зельдовича (рис. 11).

Таблица 2. Линии элементов для различных красных смещений для спектров гамма-всплесков [Vergani et al., 2009]

GRB	z_{GRB}	z_{abs}	$W_r(\lambda 2796), \text{\AA}$
GRB 021004	2,3295	0,5550	$0,248 \pm 0,025$
		1,3800	$1,637 \pm 0,020$
		1,6026	$1,407 \pm 0,024$
GRB 050730	3,9687	1,7732	$0,927 \pm 0,030$
		2,2531	$< 0,783 (0,650)$
GRB 050820A	2,6147	0,6896	$0,089 \pm 0,007$
		0,6915	$2,874 \pm 0,007$
		1,4288	$1,323 \pm 0,023$
		1,6204	$0,277 \pm 0,024$



a



б

Рис. 8. Участки спектра послесвечения гамма-всплеска GRB 021004 полученные на VLT/UVES (Very Large Telescope / Ultraviolet-Visual Echelle spectrograph) (a). Линии поглощения, отождествлённые как линии дублета MgII 2796/2803 с $z = 1,3820$ (б, справа) и с $z = 1,6020$ (б, слева)

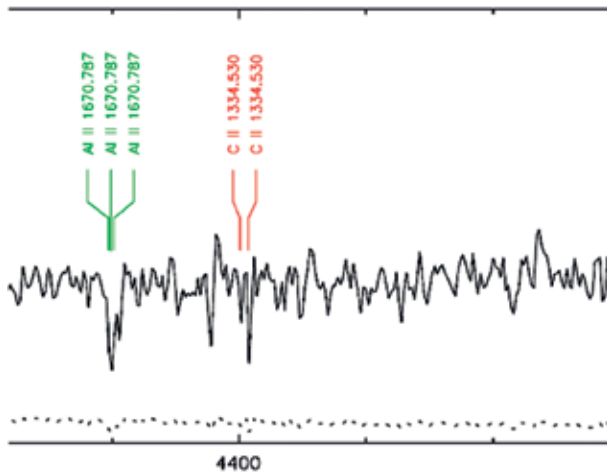


Рис. 9. Линии поглощения в спектре VLT/UVES, отождествлённые как линии CII, могут быть интерпретированы как линии дублета MgII с $z = 0,57$

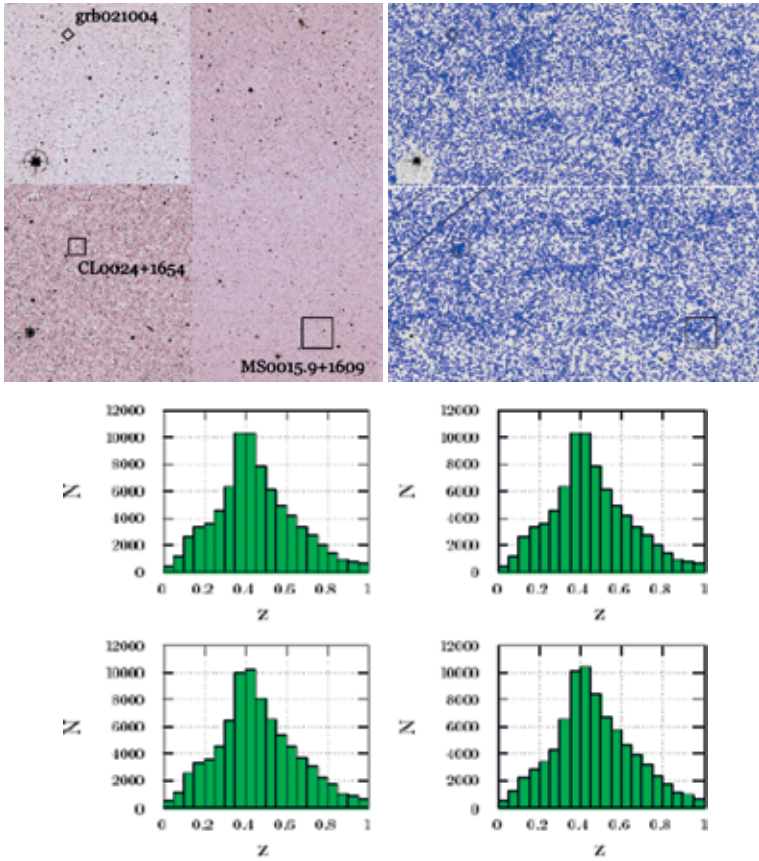


Рис 10. Поле размером $3 \times 3^\circ$, из обзора SDSS. Поле содержит площадку GRB 021004, галактический кластер CL 0024+1654 на $z = 0,5$ и галактический кластер MS00159 на $z = 0,5$ (вверху слева). Объекты из обзора SDSS DR12 (вверху справа), и распределение по красным смещениям для этих объектов для площадки $3 \times 3^\circ$, разбитой на четыре области (внизу)

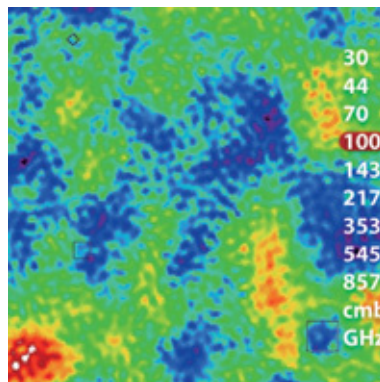


Рис. 11. Температура микроволнового фона по данным телескопа института М. Планка на частоте 100 МГц

Таким образом, исследованные фотометрические данные БТА и HST, линии поглощения в спектре послесвечения GRB 021004, данные по температуре микроволнового фона с телескопа института М. Планка и данные обзора BOSS, являющегося частью обзора SDSS, могут указывать на наличие крупномасштабной неоднородности в распределении галактик на $z \approx 0,5$.

ЛИТЕРАТУРА

- [Balazs et al., 2015] *Balazs L. G., Bagoly Z., Hakkila J. E., Horvath I., Kobori J., Racz I., Toth L. V.* A giant ring-like structure at $0.78 < z < 0.86$ displayed by GRBs // *Astrophysics. Cosmology and Nongalactic Astrophysics*. 2015. 13 p. arXiv:1507.00675.
- [Balázs et al., 2015] *Balázs L. G., Bagoly Z., Hakkila J. E., Horváth I., Kóbori J., Ráczi I., Tóth L. V.* A giant ring-like structure at $0.78 < z < 0.86$ displayed by GRBs // *MNRAS*. 2015. 13 p. arXiv:1507.00675v1.
- [Baryshev et al., 2010] *Baryshev Yu. V., Sokolov I. V., Moskvitin A. S., Fatkhullin T. A., Nabokov N. V., Kumar B.* Study of faint galaxies in the field of GRB021004 // *Astrophysical Bulletin*. 2010. V. 65. No. 4. P. 327–342.
- [Baum, 1962] *Baum W.* Photoelectric Magnitudes and Red-Shifts // *IAU Symp. 15: Problems of Extragalactic Research* / Ed. G. C. McVittie. Macmillan, New York. 1962. P. 390–400. § 4.2.1.
- [Bertin, Arnouts, 1996] *Bertin E., Arnouts S.* Extractor: Software for source extraction // *Astronomy and Astrophys. Suppl. Ser.* 117. 1996. V. 393–404.
- [Bolzonella et al., 2000] *Bolzonella M., Miralles J.-M., Pello R.* Photometric redshifts based on standard SED fitting procedures // *Astronomy and Astrophysics*. 2000. V. 363. P. 476–492.
- [Calzetti et al., 2000] *Calzetti D., Armus L., Bohlin R. C.* et al. The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies // *Astrophysical J. (ApJ)*. 2000. V. 533. P. 682. doi: 10.1086/308692.
- [Fargion, 2014] *Fargion D.* UHECR and GRB neutrinos: an incomplete revolution? // *Astrophysics. High Energy Astrophysical Phenomena*. 2014.11 p. arXiv:1408.0227.
- [Fatkhullin et al., 2004] *Fatkhullin T. A., Vasilev A. A., Reshetnikov V. P.* A photometric study of faint galaxies in the field of GRB000926 // *Astronomy Letters*. 2004. V. 30. No. 5. P. 283–292 (*Фатхуллин Т. А., Васильев А. А., Решетников В. П.* Фотометрическое исследование слабых галактик в поле гамма-всплеска GRB 000926 // *Письма в Астрон. журн.* 2004. Т. 30. № 5. С. 323–333).
- [Gomboc, 2012] *Gomboc A.* Unveiling the Secrets of Gamma Ray Bursts. 2012. 20 p. arXiv:1206.3127v1.
- [Holanda et al., 2016] *Holanda R. F. L., Busti V. C., Colazo L. R., Alcaniz J. S., Landau S. J.* Galaxy clusters: type Ia supernovae and the fine structure constant // *Astrophysics. Cosmology and Nongalactic Astrophysics*. 2016. 8 p. arXiv:1605.02578.
- [Khabibullina et al., 2014] *Khabibullina M. L., Verkhodanov O. V., Sokolov V. V.* Statistics of the Planck CMB signal in direction of gamma-ray bursts from the BATSE and BeppoSAX catalogs // *Astrophysical Bulletin*. 2014. V. 4. No. 69. arXiv:1406.6480.
- [Li, Lin, 2015] *Li Ming-Hua, Lin Hai-Nan.* Testing the homogeneity of the Universe using gamma-ray bursts // *Astronomy and Astrophysics*. 2015. arXiv:1509.03027v1.
- [Prochter et al., 2006] *Prochter G. E., Prochaska J. X., Chen H.-W.* et al. On the Incidence of Strong MgII Absorbers Along GRB Sightlines // *Astrophysical J. (ApJ)*. 2006. V. 648. P. L93–L96.
- [Shin, Berger, 2007] *Shin M.-S., Berger E.* Galaxy Clusters Associated with Short GRBs. II. Predictions for the Rate of Short GRBs in Field and Cluster Early-Type Galaxies // *Astrophysical J. (ApJ)*. 2007. V. 660. P. 1146.

- [Sudilovsky et al., 2013] *Sudilovsky V., Greiner J., Rau A.* et al. Clustering of galaxies around gamma-ray burst sight-lines // *Astronomy and Astrophysics*. 2013. A143. 8 p. doi: 10.1051/0004-6361/201321247.
- [Ukwatta, Wozniak, 2015] *Ukwatta T. N., Wozniak P. R.* Investigation of Redshift- and Duration-Dependent Clustering of Gamma-ray Bursts // *MNRAS*. 2015. 10 p. arXiv:1507.07117v2.
- [Vergani et al., 2009] *Vergani S., Petitjean P., Ledoux C.* et al. Statistics and characteristics of MgII absorbers along GRB lines of sight observed with VLT-UVES // *Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 503. Iss. 3. P. 771–781.
- [Yüksel, Kistler, 2012] *Yüksel H., Kistler M. D.* The Cosmic MeV Neutrino Background as a Laboratory for Black Hole Formation // *Astrophysics. High Energy Astrophysical Phenomena*. 2012. 5 p. arXiv:1212.4844.

INHOMOGENIETY IN SPATIAL DISTRIBUTION OF GALAXIES AT REDSHIFT $z \approx 0.5$ IN THE FIELD OF GRB021004

I. V. Sokolov^{1,4}, *A. J. Castro-Tirado*², *O. V. Verkhodanov*³, *O. P. Zhelenkova*³, *Yu. V. Baryshev*⁴

¹ Terskol Branch of Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences (INASAN)

² Institute for Astrophysics of Andalucía Spanish National Research Council (IAA-CSIC)

³ Joint Use Center “Special Astrophysical Observatory” of the Russian Academy of Sciences (RAS JUC SAO)

⁴ Saint Petersburg State University (SPbSU)

In this report we test for reliability any signatures of field galaxies clustering in the GRB 021004 line of sight. The first signature is the BTA and Hubble GRB 021004 field photometric redshift distribution with a peak at $z \sim 0.5$ estimated from multicolor photometry. The second signature is the MgII 2796,2803 absorption doublet at $z \approx 0.5$ in the GRB 021004 afterglow spectrum. The third signature is some inhomogeneity in Plank + GRB 021004 fields. And the fourth signature may be the galaxy clustering with an effective redshift of $z = 0.5$ from the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS), which is a part of the Sloan Digital Sky Survey III (SDSS-III).

Keywords: galaxy clustering, gamma-ray bursts, multicolor photometry

Sokolov Ilia Vladimirovich, junior researcher, ilia.v.sokolov@mail.ru

Castro-Tirado Alberto J. — PhD, professor

Verkhodanov Oleg Viktorovich — leading researcher, professor

Zhelenkova Olga Petrovna — senior researcher, PhD

Baryshev Yuriy Victorovich — leading researcher, professor

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН С МАЛЫМИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ДЛИНАМИ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

А. И. Суслов¹, Н. С. Ерохин^{1,2}

¹ Российский университет дружбы народов (РУДН)

² Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

На основе численных расчётов лучевых траекторий рассмотрено прохождение коротковолновых внутренних гравитационных волн (ВГВ) из тропосферы через вертикально неоднородные ветровые структуры до ионосферных высот. ВГВ могут возбуждаться в тропосфере за счёт разнообразных процессов, например, кризисных явлений, включая сейсмическую активность. При достижении ионосферных высот ВГВ могут значительно усилиться по амплитуде вследствие существенного снижения плотности нейтральной составляющей среды. В результате на ионосферных высотах будут возникать предвестники и индикаторы как сейсмических событий, так и других кризисных явлений в приземной атмосфере.

Для ряда вариантов выбора параметров ВГВ и ветровых структур изучены особенности лучевых траекторий, связанные с возникновением на трассе распространения ВГВ-слоёв горизонтального и вертикального отражений волн, а также критического слоя, в окрестности которого происходит сильное уменьшение вертикальной компоненты групповой скорости ВГВ за счёт роста вертикальной компоненты волнового вектора, а также резко возрастает поглощение волны за счёт вязкости.

Показано, что для коротковолновых внутренних гравитационных волн невозможно их прохождение из тропосферы до ионосферных высот, которому препятствуют слои вертикального отражения и критические слои, возникающие при достаточно большой скорости ветрового потока. Для конкретного вертикального профиля скорости ветра и частоты Вайсяля–Брента вычислены характерные значения длин волн ВГВ, при которых блокируется прохождение ВГВ в ионосферную плазму, величины горизонтального смещения ВГВ по достижении ими слоёв вертикального отражения и критического слоя.

Ключевые слова: внутренние волны гравитации, атмосферы, ионосферы, зональные ветры, критический слой, траектории луча.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ

Исследование процессов генерации возмущений ионосферной плазмы за счёт воздействия кризисных процессов в тропосфере относится к числу актуальных задач современной физики атмосферы и ионосферы и представляет большой интерес, в частности, для наблюдений индикаторов и предвестников кризисных атмосферных явлений спутниковой аппаратурой, корректной интерпретации данных наблюдений возмущений ионосферной плазмы, разработки методик прогноза кризисных событий.

При исследовании распространения ВГВ в неоднородной атмосфере с зональным ветром анализ проще проводить на основе метода лучевых траекторий для групповой скорости ВГВ при заданных вертикальных профилях частоты Вайсяля–Брента и зонального потока.

Сулов Александр Иванович — аспирант, chench0@yandex.ru

Ерохин Николай Сергеевич — профессор, доктор физико-математических наук

Уравнения для лучевых траекторий волнового пакета в неоднородной среде имеют вид (см., например, [Госсард, Хук, 1978; Миропольский, 1981]):

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}_g, \quad \frac{d\mathbf{k}}{dt} = -\frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{r}}.$$

Здесь $\mathbf{v}_g = \partial\omega/\partial\mathbf{k}$ — групповая скорость; $\omega(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = k_x U(z) + N(z) \cdot k_h / k$ — частота ВГВ с учётом доплеровского сдвига, где $k_h = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ — горизонтальная компонента волнового вектора. Как показывают расчёты, прохождение ВГВ в ионосферу имеет место для достаточно крупномасштабных волн, когда выполняется условие $k_h \ll k_z$.

Для удобства анализа введём безразмерные переменные $z = L_z \xi$, $x = L_x \eta$, $y = L_y \zeta$, где $L_z = 1$ км; $L_x = L_y = 5$ км. Для скорости ветра запишем $U(z) = u(\xi)$ м/с. Частоту Вайсяля–Брента нормируем на характерную величину $N(z) = \mu(\xi)/50$ с. Вводим безразмерные волновые числа $k_x = q_x/5$ км, $k_y = q_y/5$ км, $k_z = q_z/1$ км и безразмерное время $\tau = t/250$ с.

Теперь уравнения для лучевых траекторий ВГВ принимают вид

$$\frac{d\xi}{d\tau} = -\frac{\mu q_h q_z}{p^3}, \quad p = \sqrt{q_z^2 + \left(\frac{q_h}{5}\right)^2}; \quad \frac{d\eta}{d\tau} = \frac{\mu q_z^2 q_x}{p^3} q_h + \frac{u(\xi)}{20};$$

$$\frac{d\zeta}{d\tau} = \frac{\mu q_z^2 q_y}{p^3} q_h; \quad \frac{dq_z}{d\tau} = -\frac{q_x}{20} \frac{du}{d\xi} - \frac{q_h}{p} \frac{d\mu}{d\xi}.$$

Следует отметить, что для распространяющейся вверх ВГВ следует полагать $q_z < 0$, поскольку по вертикали компоненты фазовой и групповой скоростей внутренней гравитационной волны направлены противоположно. Интеграл движения для системы уравнений выше (несущая частота пакета) запишем следующим образом:

$$\varepsilon \equiv q_x \frac{u}{20} + \mu \frac{q_h}{p} = \omega T_0 / \varepsilon,$$

где $T_0 = 500\pi c \approx 26$ мин 10 с, причём $T_\omega = T_0/\varepsilon$ — период ВГВ. Величина интеграла ε определяется начальными значениями входящих в него функций ($\varepsilon = \text{const}$). Отметим также, что горизонтальная и вертикальная длина ВГВ равны: $\lambda_x = 10\pi$ (км)/ q_x ; $\lambda_y = 10\pi$ (км)/ q_y ; $\lambda_z = 2\pi$ (км)/ q_z .

Отметим главные качественные особенности взаимодействия ВГВ с фоновой неоднородной ветровой структурой. Прежде всего, при попутном относительно ветра распространении волны на некоторых высотах могут возникать критические слои z_c . В окрестности критического слоя в рассматриваемой модели вертикальная длина волны стремится к нулю, т.е. имеем $q_z^2 \rightarrow \infty$. Следовательно, групповая скорость волнового пакета также стремится к нулю, соответственно ВГВ неограниченно замедляется и полностью поглощается в критическом слое за счёт даже малой вязкости. Таким образом, критические слои z_c блокируют распространение ВГВ на ионосферные высоты. При $q_z \rightarrow \infty$ критическая скорость потока равна $u_c = 20\varepsilon/q_x$, т.е. $U = \omega/k_x$. Поскольку волна распространяется в попутном к ветру направлении, u_c определяется значениями интеграла ε и компоненты волнового вектора q_x . Таким

образом, если максимальная скорость ветрового потока $u_{\max} > u_c$, то в ветровой структуре на некоторой высоте имеется критический слой.

При встречном к ветру распространении ВГВ могут существовать слои горизонтального и вертикального отражений. Отражение по горизонтальному направлению x происходит в некотором слое ξ_{rx} , где горизонтальная групповая скорость пакета равна нулю, т. е. $v_{gx} = 0$. Это даёт условие:

$$\frac{u(\xi_{rx})}{20} + \frac{\mu(\xi_{rx})q_x [q_z(\xi_{rx})]^2}{q_h} p(\xi_{rx})^3 = 0.$$

Условие горизонтального (по оси x) отражения ВГВ встречным ветровым потоком можно записать в виде $u(\xi) = u_{rx}(\xi)$. Графически слои горизонтального отражения ВГВ встречным ветром z_{rx} (т. е. ξ_{rx}) определяются точками пересечения кривых $u(\xi)$ и $u_{rx}(\xi)$. В слоях ξ_{rx} происходит отражение пакета ВГВ назад, к источнику их генерации.

Слои вертикального отражения пакета ВГВ встречным ветром z_{rz} соответствуют условию $v_{gz} = 0$, т. е. $q_z(z) = 0$. На этом вертикальном уровне выполняется следующее условие $\varepsilon = 5\mu(\xi_{rz}) + [q_x u(\xi_{rz})/20]$. Вводя функцию $u_{rz}(\xi) \equiv 20[\varepsilon - 5\mu(\xi)]/q_x$, находим, слои вертикального отражения ВГВ фоновой ветровой структурой z_{rz} как точки пересечения ξ_{rz} кривой $u(\xi)$ с кривой $u_{rz}(\xi)$. Следует отметить, что выполняется условие $u_{rz}(\xi) < u_c$. В слоях ξ_{rz} происходит отражение пакета ВГВ вниз.

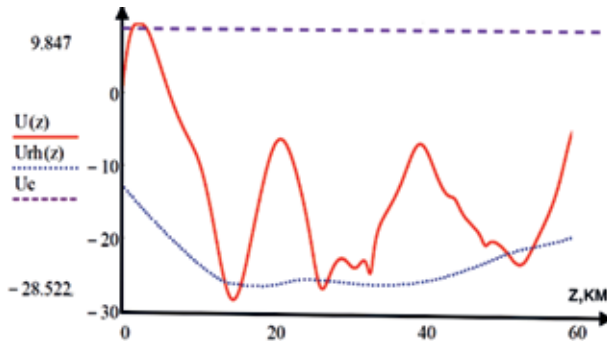


Рис. 1. Профили скоростей $U(z)$, $U_h(x)$

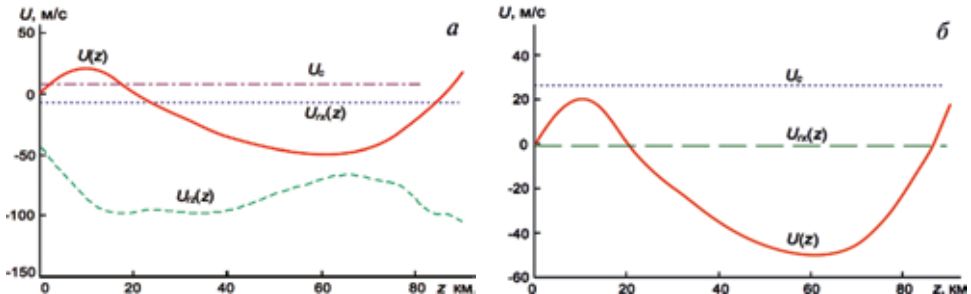


Рис. 2. Графики скоростей $U(z)$, $U_h(x)$ (а); вертикальные профили скоростей $U(z)$, $U_rz(x)$ (б)

Таким образом, аналогично критическим уровням ξ_c эти слои также препятствуют прохождению ВГВ на ионосферные высоты. Один из вариантов расчётов с выбором параметров $q_z(0) = -8$, $q_x = q_y = 2$ представлен на рис. 1, где по вертикали — скорость в м/с, а по горизонтали — z в км.

В данном варианте исходных параметров задачи на низких высотах есть два (близко расположенных) критических слоя, а также имеется шесть слоёв горизонтального отражения в диапазоне высот от 6 до 56 км. Необходимо также указать, что в общем случае анализа данной задачи в системе возможно присутствие, например, двух слоёв вертикального отражения z_1 , z_2 , разнесённых по высоте. Соответственно, в таком варианте в атмосфере для ВГВ может быть реализован горизонтальный волновод в области высот $z_1 < z < z_2$. Этот вопрос представляет интерес для последующих исследований динамики ВГВ в неоднородной атмосфере с зональными ветрами.

Другой случай вертикального профиля зонального ветра показан на рис. 2. Рассмотрим графики $U(z)$, U_{rx} , U_{rz} , U_c , представленные на рис. 2а. В этом варианте имеются два слоя горизонтального отражения на высотах $z \approx 24$ км, $z \approx 83$ км. Слоёв вертикального отражения нет, но есть два критических слоя. Другой вариант компонент волнового вектора $q_z(0) = -8$, $q_x = q_y = 4$ и профиля скорости ветра дан на рис. 2б графиками $U(z)$, $U_{rz}(x)$. Здесь есть два слоя горизонтального отражения при $z \approx 23$ км, $z \approx 89$ км.

ВЫВОДЫ

Из проведённых численных расчётов можно сделать следующие выводы.

1. Для крупномасштабных ВГВ, когда горизонтальные длины волн составляют величину порядка десятков километров и более, имеются зависящие от исходных вертикальных профилей ветра $U(z)$ и частоты Вайсяля—Брента $N(z)$ диапазоны горизонтальных волновых чисел k_x , k_y , в которых наблюдается прохождение пакетов ВГВ из нижней тропосферы до ионосферных высот ($z > 80$ км).
2. Основным препятствием, ограничивающим прохождения ВГВ с частотой ω в ионосферу, является наличие в атмосфере критических слоёв z_c , в которых скорость ветра $U(z)$ имеет критическое значение ω/k_x , а вертикальное волновое число $k_z(z)$ возрастает во много раз (при отсутствии диссипации его рост не ограничен). Это приводит к сильному замедлению скорости распространения ВГВ и поглощению волн даже при весьма слабой диссипации в узкой окрестности критического слоя. Величина критической скорости U_c уменьшается при увеличении горизонтального волнового числа q_h , т.е. при уменьшении горизонтальной длины волны. Согласно расчётам, для ВГВ с достаточно большой горизонтальной длиной волны критические слои отсутствуют.
3. При высоких скоростях зонального ветра прохождение ВГВ из тропосферы в ионосферу становится невозможным вследствие наличия слоёв вертикального отражения z_{rz} , в которых вертикальная компонента волнового вектора $k_z(z_{rz})$ обращается в нуль. Для исследованных выше профилей $U(z)$, $N(z)$ наиболее вероятным препятствием прохождению ВГВ в ионосферу оказалось возникновение критических слоёв, причём

часто на довольно низких высотах. Поскольку зональный ветер по высоте обычно имеет осциллирующую структуру скорости $U(z)$, непропускание волн на ионосферные высоты возможно для обоих направлений горизонтального распространения ВГВ: восток-запад и запад-восток.

4. Проведённые исследования показали, что в большинстве случаев выбора исходных параметров задачи для ВГВ возникают слои горизонтального отражения z_{rh} , которые сильно меняют величину горизонтального смещения ВГВ от источника их генерации при распространении в ионосферу. Возможны ситуации, когда над источником генерации ВГВ пакет может проходить несколько раз на различных высотах. Соответственно, возбуждаемые ВГВ ионосферные возмущения могут находиться как западнее, так и восточнее источника генерации этих волн, например, мощного тропосферного вихря.
5. Выполненные расчёты подтвердили вывод предыдущей работы авторов настоящей статьи [Ерохин и др., 2007], что в зависимости от ветровой структуры $U(z)$, высотного профиля частоты Вайясяля–Брента $N(z)$ и исходных данных волн горизонтальное смещение ВГВ при достижении ионосферных высот может меняться в весьма широких пределах — от сотен до многих тысяч километров. Время прохождения ВГВ наверх также меняется в широких пределах — от часов до нескольких суток и более в зависимости от параметров задачи. Указанные обстоятельства следует учитывать при планировании и проведении экспериментов по регистрации ионосферных откликов, создаваемых в ионосферной плазме приходящими из тропосферы крупномасштабными ВГВ, а также для корректной интерпретации данных наблюдений ионосферных откликов на тропосферные возмущения. Важно отметить, что согласно расчётам в атмосфере с ветровыми структурами могут существовать области весьма сильного замедления волнового пакета (малые групповые скорости v_{gz}), на прохождение которых затрачивается большая часть времени распространения до ионосферы. Одновременно будет резко возрастать горизонтальное смещение ионосферного отклика относительно области генерации ВГВ.

Из проведённых расчётов видно, что для целей прогнозирования условий передачи возмущений из тропосферы в ионосферу следует выполнять анализ задачи для конкретного региона с учётом возможных в нём высотных профилей зонального ветра $U(z)$, температуры атмосферы $T_0(z)$, а также их сезонной изменчивости. Из приведённых, например, в работе [Черный и др., 2003] данных следует, что характерные горизонтальные масштабы атмосферных температурных полей на высотах $z \approx 15$ км достаточно велики и составляют 700...3000 км, т. е. на два-три порядка больше типичных вертикальных масштабов. Именно по этой причине в проведённых выше расчётах горизонтальные неоднородности температурно-ветровых структур не учитывались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе лучевых траекторий проведён анализ ряда вариантов распространения ВГВ из приземной атмосферы до ионосферных высот в случае коротковолновых ВГВ. Показано, что возникают слои вертикального отражения и критические слои, блокирующие прохождение ВГВ на ионосферные высоты. Это нужно учитывать при проведении экспериментов по регистрации ионосферных откликов, создаваемых в ионосферной плазме проходящими из тропосферы ВГВ и для корректной интерпретации данных наблюдений ионосферных откликов на тропосферные возмущения. Данное исследование будет продолжено в последующих работах для широкого набора характерных параметров задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [Госсард, Хук, 1978] *Госсард Э. Э., Хук У. К.* Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
- [Ерохин и др., 2007] *Ерохин Н. С., Михайловская Л. А., Шалимов С. Л.* Прохождение крупномасштабных внутренних гравитационных волн через ветровые структуры в нижней и средней атмосфере на ионосферные высоты // *Геофиз. исслед.* 2007. Вып. 7. С. 53–64.
- [Миропольский, 1981] *Миропольский Ю. З.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 302 с. Определение частоты Вайсяля–Брента, С. 11–15.
- [Черный и др., 2003] *Черный И. В., Чернявский Г. М., Успенский А. Б., Пегасов В. М.* СВЧ-радиометр МТВЗА спутника «Метеор-3М» № 1: Предварительные результаты лётных испытаний // *Исслед. Земли из космоса.* 2003. № 6. С. 1–15.

THE PROPAGATION OF SHORT WAVELENGTH IGW IN THE IONOSPHERE

A. I. Suslov¹, N. C. Erokhin^{1,2}

¹ People Friendship University of Russia (RUDN University)

² Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI RAN)

On the basis of numerical calculations it is considered the interaction of internal gravity waves (IGW) having the short vertical wavelength with vertically inhomogeneous zonal winds in the atmosphere under IGW propagation to the ionospheric plasma. The possibility for IGW passage up to the ionospheric altitudes are analyzed. It has been shown that IGW having small enough vertical wavelength can't propagate to the ionospheric plasma altitudes due to the presence of vertical reflection layers and the critical one appearing due to the zonal winds with large enough velocity maximum magnitude. Thus the vertical reflection layers and the critical one are blocking the IGW propagation to the ionospheric altitudes. So the generation of ionospheric plasma perturbations by short vertical wavelength IGW is absent. Thus the appearance of indicators of tropospheric crisis processes in ionospheric plasma due to short wavelength IGW is becomes impossible.

Keywords: internal gravity waves, atmosphere, ionosphere, zonal winds, critical layer, beam trajectories.

Suslov Aleksandr Ivanovich — postgraduate student, chench0@yandex.ru

Erokhin Nikolaj Sergeevich — professor, doctor of physical and mathematical sciences

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

А. И. Таганов, А. Н. Колесенков

Рязанский государственный радиотехнический университет (РГРТУ)

В работе рассмотрены современные методы и технологии обработки спутниковых данных в задачах построения геоинформационных систем мониторинга чрезвычайных ситуаций. Предложена методика применения геоинформационных систем в задачах обработки разнородных данных. Исследованы способы адаптации алгоритмов обработки данных к работе в условиях неполной информации. Выполнены исследования методов вегетационного индексирования космических снимков. Представлены результаты экспериментальных исследований по тестированию алгоритмов на реальных данных со спутников «Электро-Л» и «Канопус-В».

Работа выполняется при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Совета по грантам Президента Российской Федерации, Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект «Геоинформационная система космического on-line мониторинга опасных объектов и экосистем»).

Ключевые слова: мониторинг, чрезвычайная ситуация, ЧС, геоинформационная система, ГИС, нечёткая кластеризация, вегетационный индекс, генетический подход, эволюционный алгоритм, спутниковый снимок.

Ежегодно потенциально опасные объекты и территории подвергаются воздействию ряда неблагоприятных факторов, среди которых можно выделить пожары, затопления, загрязнения, вырубку лесов, незаконные свалки твёрдых бытовых отходов и т.д., которые зачастую приводят к возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера. Своевременная информационная поддержка процедур принятия управленческих решений при реализации процедур прогнозирования, предупреждения, обнаружения, ликвидации и оценке последствий ЧС является важной и актуальной задачей на сегодняшний день [Колесенков, 2015a]. С учётом распределения потенциально опасных объектов по обширной территории и существенных площадей, занимаемых ими, целесообразным является разработка, внедрение и комплексное использование новых эффективных технологий спутникового мониторинга этих объектов. Использование оперативной аэрокосмической информации позволяет успешно осуществлять мониторинг как быстро протекающих, так и протекающих медленно процессов, охватывающих большие территории [Прэтт, 1982].

В работе представлены результаты исследований по разработке математических и алгоритмических основ построения систем мониторинга, способных осуществлять эффективную информационную поддержку деятельности по прогнозированию, раннему обнаружению, предупреждению, ликвидации и оценке последствий ЧС. Учитывая разнородность информации, поступающей

Таганов Александр Иванович — заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор

Колесенков Александр Николаевич — доцент, кандидат технических наук, sk62@mail.ru

из различных источников, целесообразным является применение геоинформационных систем (ГИС), позволяющих проводить комплексную обработку и анализ такой информации. ГИС позволят анализировать пространственное расположение и взаимное влияние объектов, осуществлять моделирование процессов и явлений природного и техногенного характера, осуществлять информационную поддержку по предупреждению экологических катастроф [Бескид и др., 2013].

ГИС, как правило, базируется на картографической основе с единой системой координат, на базах географических данных, являющуюся местом хранения информации об анализируемых объектах и территориях, на наборе алгоритмов и программных модулей для выполнения различных задач, направленных на снижение риска возникновения экологических происшествий [Колесенков, 2016а].

К задачам ГИС мониторинга ЧС относятся:

- мониторинг и прогнозирование динамики изменения состояния наблюдаемых объектов и территорий в пространстве и во времени;
- построение тематических карт заданных территорий;
- моделирование природных и антропогенных процессов;
- раннее выявление неблагоприятных факторов.

На сегодняшний день в области проектирования ГИС экологического мониторинга остаётся нерешённым ряд проблемных вопросов:

- отсутствие эффективных методов и алгоритмов обработки данных ДЗЗ в условиях неполной и нечёткой информации;
- отсутствие эффективных методов и алгоритмов мониторинга объектов на основе искусственного интеллекта и генетических подходов;
- существующие системы мониторинга ЧС не используют множества современных подходов, методов и алгоритмов [Колесенков и др., 2016].

Для оперативного выявления неблагоприятных факторов на наблюдаемом объекте или территории в системах мониторинга предлагается использовать метод кластеризации пикселей аэрокосмических изображений по уровням яркости на основе теории нечётких множеств [Ruchkin et al., 2013, 2014]. Концепция частичной принадлежности, когда пиксель изображения может принадлежать одновременно нескольким кластерам, позволяет более точно вычислить элементы кластера и использовать это для дальнейшей обработки изображения.

Предлагается алгоритм нечёткой кластеризации для идентификации очагов пожаров по аэрокосмическим снимкам. Он позволяет разбить изображение на несколько групп и выявить проблемный участок, содержащий, например, очаг возгорания.

Модернизированный алгоритм нечёткой кластеризации сравнивает RGB (Red, Green, Blue — красный, зелёный, синий — аддитивная цветовая модель) значение каждого пикселя со значением центра группы. Чем выше значение принадлежности, тем с большей вероятностью пиксель принадлежит этой группе.

Объединение в кластеры происходит минимизацией целевой функции, показанной в уравнении:

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c \mu_{ik}^m |E_{ik}|,$$

где J — целевая функция; c — количество кластеров; n — количество пикселей; μ — значение принадлежности; m — параметр нечёткости; E_{ik} — евклидово расстояние p_i и v_k .

В качестве исходных данных использовались космические снимки с российского спутника «Канопус-В». Результаты работы алгоритма представлены на рис. 1.

Мониторинг динамики состояния опасных объектов предлагается провести с применением подходов, в основе которых лежат нормализованные вегетационные индексы. Вегетационные индексы представляют собой показатели, которые вычисляются в результате обработки мультиспектральных данных [Черепанов, 2012].

В результате проведения исследований установлено, что для выполнения задач мониторинга ЧС целесообразно использовать следующие индексы:

- почвенный вегетационный индекс;
- трансформированный почвенный вегетационный индекс;
- индекс глобального мониторинга окружающей среды;
- вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы;
- водный индекс;
- нормализованный разностный водный индекс.

Результаты экспериментальных исследований по прогнозированию динамики состояния наблюдаемой территории с применением снимков российского спутника «Электро-Л» представлены на рис. 2.

Использование отражения в узких спектральных каналах позволяет этим индексам фиксировать даже небольшие изменения состояния территории.

Особое внимание в работе уделяется эволюционному моделированию, включающему применение генетических алгоритмов в задачах экологического мониторинга объектов и территорий [Колесенков, 2016б; Рутковская и др., 2006].

Формирование новой популяции осуществляется за счёт использования операторов селекции, мутации и скрещивания.

$$x_i^{k+1} = P_m P_C P_S \{x_i^k\}.$$

Оператор селекции представляет собой следующее: из набора представленных хромосом выбираются только те, которые будут участвовать в создании нового поколения путём отбора по наивысшим значениям критерия «приспособленности». Предлагаемый метод позволяет осуществлять мониторинг наблюдаемого объекта или территории под воздействием неблагоприятных факторов, поиск источников загрязнения, контроль вредных выбросов, оценку состояния природных ресурсов.

Оценка риска принятия решений по прогнозированию, моделированию, обнаружению и сопровождению ЧС проводится на основе логико-вероятностного исчисления (ЛВИ), которое предназначено для количественной оценки безотказности сложных технических структур. Она базируется на правилах

замещения логических аргументов в функциях алгебры логики вероятностями их истинности, а логических операций — арифметическими.

Привлекательность ЛВИ заключается в его исключительной чёткости и однозначности количественной оценки риска, а также в больших возможностях при анализе влияния любого элемента на надёжность и безопасность всей системы [Колесенков, Фетисов, 2015].



Рис. 1. Результаты идентификации пожара

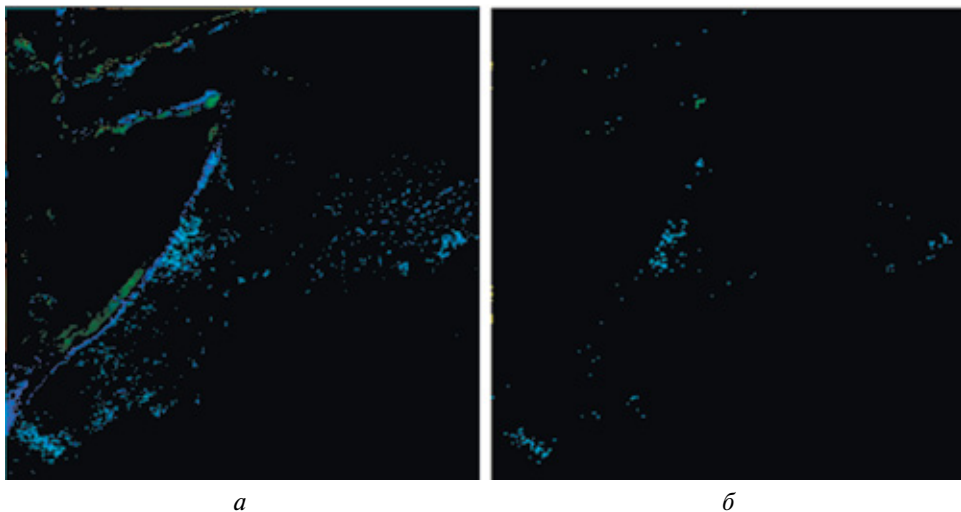


Рис. 2. Нормализованная разность вегетационных индексов с порогом 50 (а) и 150 (б)

Логическая функция безопасного функционирования системы представляется как $Y_{БФ} = Y(x_i)$, где x_i — логическая переменная, характеризующая состояние подсистемы i ; $i = 1, n$, n — количество подсистем в системе.

Полученный в результате работы программный модуль позволяет моделировать динамику изменений основных параметров объектов и территорий, динамику взаимодействия объекта с его окружением для своевременного прогнозирования ЧС и количественной оценки масштаба ущерба, нанесённого катастрофами, а так же предоставляет возможность контроля состояния опасных объектов и территорий [Колесенков, 2015б].

Применение современных геоинформационных технологий совместно с оперативной аэрокосмической информацией позволяет на порядок сократить время доступа, обработки и подготовки данных, что существенно повысит качество предоставляемой информации при решении задач мониторинга объектов и территорий, прогнозирования, предупреждения и раннего обнаружения ЧС природного и техногенного характера.

ЛИТЕРАТУРА

- [Бескид и др., 2013] *Бескид П. П., Куракина Н. И., Орлова Н. В.* Геоинформационные системы и технологию [Электронный ресурс]. СПб.: Рос. гос. гидрометеорологич. ун-т, 2013. 173 с. URL: <http://bookoteka.ru/17902>.
- [Колесенков, 2015а] *Колесенков А. Н.* Технология поддержки принятия управленческих решений на основе оперативного мониторинга пожарной обстановки // Изв. ТулГУ. Технич. науки. Вып. 9. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 157–163.
- [Колесенков, 2015б] *Колесенков А. Н.* Программный модуль идентификации пожара на основе нечёткой кластеризации пикселей // Хроники Объединённого фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2015. № 11(78). С. 50–51.
- [Колесенков, 2016а] *Колесенков А. Н.* Спутниковый мониторинг в задачах информационной поддержки процедур принятия управленческих решений по предупреждению чрезвычайных ситуаций // Тезисы докладов 13-й Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». М.: ИКИ РАН, 2016. С. 47.
- [Колесенков, 2016б] *Колесенков А. Н.* Применение генетических подходов в задачах моделирования чрезвычайных ситуаций // Предупреждение. Спасение. Помощь: Сб. материалов 26-й Международ. научно-практич. конф. 17 марта 2016. Химки: ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России. 2016. С. 111–114.
- [Колесенков, Фетисов, 2015] *Колесенков А. Н., Фетисов Д. В.* Математическое моделирование в задачах космического мониторинга процессов недропользования // Мат. методы в технике и технологиях ММТТ-28: сб. тр. 28-й Международ. науч. конф. Т. 9. Саратов: Саратовский гос. технич. ун-т, 2015. С. 142–144.
- [Колесенков и др., 2016] *Колесенков А. Н., Костров Б. В., Ручкин В. Н.* Киберфизические технологии мониторинга чрезвычайных ситуаций // Изв. ТулГУ. Технич. науки. Вып. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 252–260.
- [Прэтт, 1982] *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений. Кн. 1. М.: Мир, 1982. 311 с.
- [Рутковская и др., 2006] *Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. М.: Горячая линия — Телеком, 2006. 452 с.
- [Черепанов, 2012] *Черепанов А. С.* Вегетационные индексы // Геоматика. 2012. № 2. С. 98–102.

- [Ruchkin et al., 2013] *Ruchkin V. N., Kostrov B. V., Kolesenkov A. A.* Emergencies monitoring and preventing // Proc. 2nd Mediterranean Conf. Embedded Computing MECO 2013. Montenegro, Budva. 2013. P. 89–93.
- [Ruchkin et al., 2014] *Ruchkin V. N., Kostrov B. V., Kolesenkov A. N., Ruchkina E. V.* Anthropogenic Situation Express Monitoring on the Base of Fuzzy Neural Networks // Proc. 3rd Mediterranean Conf. Embedded Computing MECO 2014. Montenegro, Budva. 2014. P. 166–169.

MODERN METHODS OF INFORMATION SYSTEMS CONSTRUCTION FOR EMERGENCY SATELLITE MONITORING

A. I. Taganov, A. N. Kolesenov

Ryazan State Radio Engineering University (RSREU)

The paper deals with modern methods and technologies for the processing of satellite data in problems of construction of geoinformation systems for monitoring emergency situations. The method of application of geographic information systems in heterogeneous data processing tasks. We explore ways to adapt these algorithms to work in conditions of incomplete information. The studies of methods of vegetation index space images. The results of experimental studies to test the algorithms on real data from satellite Elektro-L and Canopus-B.

Keywords: monitoring, emergency, disaster, Geographic Information System, GIS, fuzzy clustering, vegetation index, the genetic approach, evolutionary algorithm, a satellite image.

Taganov Alexander Ivanovich — head of department, doctor of technical sciences, professor
Kolesenkov Alexander Nikolaevich — associate professor, PhD, sk62@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Бардаков Н. Н., Растоскуев В. В.</i> Обзор существующих методик выявления пожаров по спутниковым снимкам.	5
<i>Бецис Д. С., Фёдорова А. А., Монтмессан Ф., Кораблёв О. И., Ж.-Берто Л.</i> Изучение марсианского аэрозоля по данным солнечных затмений эксперимента SPICAM IR на космическом аппарате «Марс-Экспресс».	16
<i>Богачёв А. М., Крылов В. П.</i> Параметризация вольт-амперных характеристик полупроводниковой электронной компонентной базы электронных средств космических аппаратов.	24
<i>Додин А. В.</i> Перенос излучения в задаче моделирования спектра газа, аккрецируемого на поверхность молодых звёзд.	29
<i>Ерохин А. Н., Милантьев В. П.</i> Серфотронное ускорение ядер гелия электромагнитной волной в космической плазме	37
<i>Маланчев К. Л., Липунова Г. В.</i> Модель эволюции аккреционного диска в широкой рентгеновской двойной 4U 1543–47 во время вспышки 2002 года.	44
<i>Михайлов Е. А., Грачев И. Д. А.</i> Корреляционная функция для уравнений со случайными коэффициентами, возникающих при моделировании магнитных полей галактик.	54
<i>Пронин Т. Ю., Варакин А. А., Крылов В. П.</i> Обеспечение вибропрочности электронных средств космических аппаратов . . .	60
<i>Резаева А. А., Щербина М. П.</i> Спектрофотометрическое исследование ряда астероидов, сближающихся с Землёй	66
<i>Савкин Л. В.</i> Графоаналитическое моделирование бортовых регенеративных электронных систем космических аппаратов	79
<i>Савкин Л. В., Дмитриев В. Г., Федоров Е. А.</i> Многослойные перцептроны в бортовых системах космической техники: аппаратные подходы на базе ПЛИС FPGA.	96

<i>Сербинов Д. В., Семена Н. П.</i>	
Термостабилизация научной аппаратуры в условиях сильнопеременных внешних тепловых потоков на поверхности Международной космической станции	107
<i>Соколов И. В., Кастро-Тирадо А. Дж., Верходанов О. В., Желенкова О. П., Барышев Ю. В.</i>	
Неоднородность в пространственном распределении галактик на $z \approx 0,5$ в направлении на гамма-всплеск GRB 021004	119
<i>Сулов А. И., Ерохин Н. С.</i>	
Исследование прохождения внутренних гравитационных волн с малыми вертикальными длинами волн в ионосферу	131
<i>Таганов А. И., Колесенков А. Н.</i>	
Современные методы построения геоинформационных систем спутникового мониторинга чрезвычайных ситуаций	137