



ХІХ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ
КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

13–15 апреля 2022 года
ИКИ РАН, Москва

СБОРНИК ТРУДОВ

Под редакцией
А. М. Садовского

Серия «МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА»

МОСКВА
ИКИ РАН
2022

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

IKI, Moscow, 13–15 April 2022

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

The XIX Young Scientists Conference “Fundamental and Applied Space Research” (<https://kmu.cosmos.ru>) dedicated to the Cosmonautics Day, traditionally took place at Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences on 13–15 April 2022. The conference was organized by the Scientific and Outreach Centre of the Space Research Institute. Students, postgraduates and young scientists as well as their senior colleagues participated in the conference, and more than 130 talks were presented. These Conference Proceedings contain selected articles prepared by speakers. The Proceedings are included in the Russian Science Citation Index library.

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

ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2022 г.

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

XIX Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (<https://kmu.cosmos.ru/>), посвящённая Дню космонавтики, традиционно проводилась в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) Научно-образовательным центром ИКИ РАН 13–15 апреля 2022 г. В конференции принимали участие студенты, аспиранты и молодые учёные, а также их старшие коллеги, было представлено более 130 докладов. Настоящий сборник трудов конференции содержит избранные статьи, подготовленные докладчиками. Сборник включён в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Серия «МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА»

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

Астрофизические, геофизические, медико-биологические исследования, солнечно-земная физика, мониторинг Земли и её природных ресурсов остаются ведущими, применительно к космическим исследованиям, фундаментальными направлениями современной физики и астрономии.

В большой мере условием интенсивного научно-технологического развития страны становится подготовка новых поколений специалистов и развитие их потенциала, в том числе для реализации новых амбициозных проектов по исследованию космического пространства.

Ежегодная конференция молодых учёных, приуроченная ко Дню космонавтики, проходит на базе ИКИ РАН уже почти два десятка лет и объединяет российских и зарубежных студентов, аспирантов и молодых учёных, решивших связать своё будущее с космической отраслью.

Конференция традиционно проходит в течение трёх дней, в которые две секции идут параллельно, что позволяет участникам познакомиться с исследованиями в разных областях и даёт возможность наладить междисциплинарные контакты.

Тематика конференции достаточно широка и включает в себя следующие направления:

- Физика солнечной системы
- Астрофизика и радиоастрономия
- Дистанционное зондирование Земли
- Космическое приборостроение и эксперимент
- Теория и моделирование физических процессов
- Исследование планет

Приглашаем к участию в наших мероприятиях всех интересующихся космическими исследованиями. Вся информация о проводимых мероприятиях можно найти на сайте ИКИ РАН www.cosmos.ru.

А. М. Садовский

СРАВНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КАМЧАТСКИХ ПЕПЛОВ С ЛУННЫМ РЕГОЛИТОМ

И. А. Агапкин

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)
Москва, Россия

Вулканические пеплы по гранулометрическому составу довольно близки к лунному реголиту, это делает их подходящим материалом для разработки лунных грунтов аналогов.

Ключевые слова: лунный грунт-аналог, гранулометрический состав, камчатские пеплы

Все аналоги лунного реголита изготавливаются, как правило, для имитации одного-двух основных свойств, необходимых для исследований, моделирования и экспериментов. Практически невозможно создать полный аналог лунного реголита на основе земных пород, соответствующий всем основным свойствам — физико-механическим, теплофизическим, электромагнитным, химическим и минеральным составам (Слюта, 2014).

Для имитаторов физико-механических свойств лунного реголита одна из важнейших характеристик — гранулометрический состав. Размер частиц лунного реголита близок к размеру частиц земных вулканических пеплов. Также некоторые вулканические пеплы могут быть сходны с лунным реголитом по химическому и минералогическому составу.

В настоящей работе проведён сравнительный анализ гранулометрического состава лунного реголита и вулканических пеплов Камчатки.

Для исследования взяты пробы пепла вулканов Горелый, Мутновский, Толбачик, а также песок Халактырского пляжа. Две пробы были взяты у подножия влк. Горелый и с высоты 1390 м.

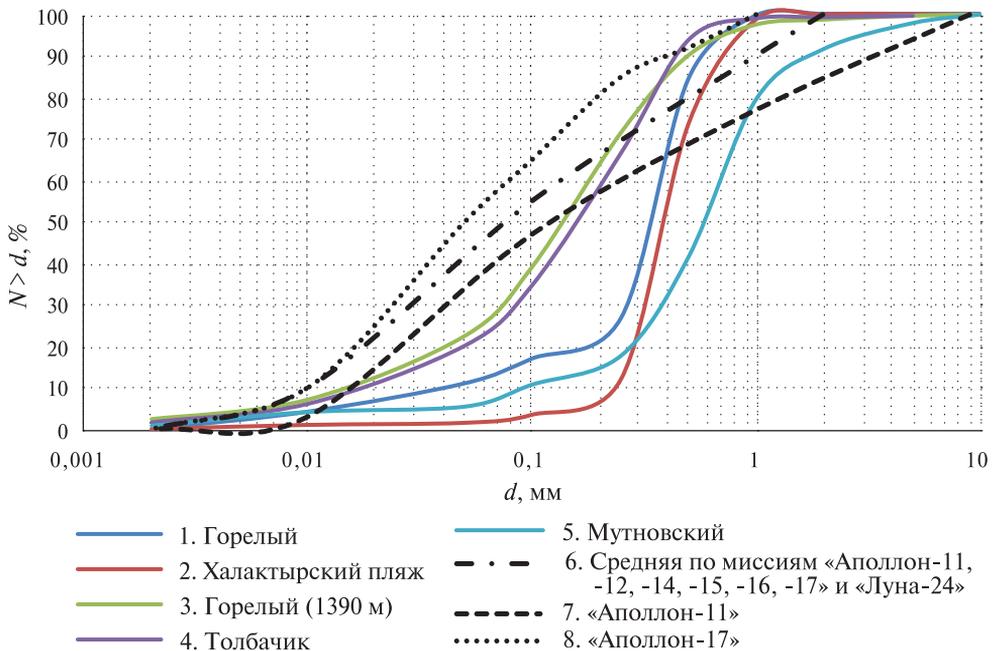
Все образцы исследовались в естественном составе, за исключением образца из влк. Толбачик. В связи с тем, что материал из влк. Толбачик имеет низкую прочность и подвержен лёгким механическим воздействиям, для измельчения материала использовались подручные средства. При подготовке пробы с влк. Толбачик была применена следующая методика: 1) дробление материала молотком; 2) просеивание измельчённого материала через сита диаметром 1–0,16 мм; 3) шлифование материала валикообразным предметом; 4) просеивание измельчённого материала через сита диаметром 1–0,16 мм; 5) истирание просеянного материала до фракций <160 мкм.

Для определения гранулометрического состава необходимо знать плотность твёрдых частиц, которую определяли с помощью пикнометра по ГОСТ 5180-2015 (<https://docs.cntd.ru/document/1200126371>). Гранулометрический состав определяли с помощью ареометра по методике ГОСТ 12536-2014 (<https://docs.cntd.ru/document/1200116022>).

Результаты определения плотности частиц: 2,6; 3,0; 2,6; 3,93; 2,72 г/см³ Горелый, Халактырский пляж, Горелый (1390 м), Толбачик, Мутновский соответственно. Плотность частиц лунного реголита 3,01 г·см⁻³, таким образом образцы с Халактырского пляжа и с влк. Толбачик по плотности частиц наиболее близки к лунному реголиту.

По результатам определения гранулометрического состава было установлено, что к лунному реголиту ближе всего образцы с вулканов Толбачик и Горелый

(1390 м). Коммулятивные кривые гранулометрического состава этих проб наиболее близки к кривой, составленной по результатам исследований миссий «Аполлон-11, -12, -14, -15, -16, -17» и «Луна-24» (рисунок).



Куммулятивные кривые гранулометрического состава лунного грунта и исследуемых образцов: 1 — Горелый; 2 — Халактырский пляж; 3 — Горелый (1390 м); 4 — Толбачик; 5 — Мутновский; 6 — усреднённый гранулометрический состав лунного грунта по данным разных миссий («Аполлон-11, -12, -14...-17» и «Луна-24») (Carrier, 2003); 6 — место посадки «Аполлона-11» (Preliminary..., 1969); 8 — место посадки «Аполлона-17» (Slyuta, 2014)

ЛИТЕРАТУРА

- Слюта Е. Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // Астрон. вестн. Исслед. Солнеч. системы. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382. DOI: 10.7868/S0320930X14050053.
- Slyuta E. N., Physical and mechanical properties of the lunar soil (A review) // Solar System Research. 2014. V. 48. Iss. 5. P. 330–353. DOI: 10.1134/S0038094614050050.
- Carrier W. D. III, Asce F. Particle size distribution of lunar soil // J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. V. 129. No. 10. P. 956–959. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:10\(956\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(956)).
- Preliminary examination of lunar samples // Apollo 11 Preliminary Science Report. NASA SP-214, 1969. P. 123–142.

COMPARISON OF THE GRAIN SIZE COMPOSITION OF KAMCHATKA ASH WITH LUNAR REGOLITH

I. A. Agapkin

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS (GEOKHI RAS), Moscow, Russia

Volcanic ash is quite similar in grain size composition to lunar regolith, which makes it a suitable material for developing lunar soil analogues.

Keywords: lunar soil analogue, grain size composition, Kamchatka ashes

Agapkin Ivan Arkadevich — junior researcher, agapkin@geokhi.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОБЛАЧНОСТИ ЯНВАРЯ И ИЮЛЯ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

М. А. Алимпиева, С. В. Морозова, Н. В. Короткова

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия

По спутниковой информации об облачности построено среднее многолетнее поле облачности за два десятилетия: 2001–2010 и 2011–2020 гг. в январе и июле. Установлено, что средние климатические поля в январе и июле хорошо отражают основные климатические закономерности распределения облаков на Северном полушарии. Анализ изменения облачных полей от одного десятилетнего промежутка к другому позволил выявить области, в которых происходит увеличение или уменьшение облачности. И в январе, и в июле наблюдается тенденция увеличения облачности в районе экватора. В январе выявлено увеличение облачности в высоких широтах. Делается вывод, что увеличение облачности в районе экватора не способствует развитию потепления в этой зоне. Увеличение облачности в полярных широтах в январе может рассматриваться как фактор, препятствующий выхолаживанию и стимулирующий развитие потепления в Арктическом бассейне.

Ключевые слова: облачность, спутниковая информация, климатические изменения, изменчивость облачных полей

Облачный покров как самый мощный и изменчивый регулятор радиационного режима нашей планеты принадлежит к числу важнейших факторов формирования климата. Однако регулярные наблюдения за облачным покровом сопряжены с определёнными сложностями. Одна из них связана с оценкой облачности наблюдателем на метеорологических станциях. Кроме некоторой доли субъективизма в определении балла и формы облаков, метеонаблюдения за облаками фрагментарны и не дают глобального охвата. Данную проблему можно устранить, используя дистанционные наблюдения за облачным покровом — спутниковую информацию.

Однако соотнесение данных наземных наблюдений о количестве облаков и спутниковой информации об облачности также непростая задача. Если наблюдатель оценивает облачность в пределах обычного горизонта, то спутниковая аппаратура оценивает облачность в ячейках в соответствии с определённым разрешением. Поэтому при спутниковом мониторинге полей облачности обычно используется термин «облачная фракция» (Чернокульский, 2015; Чернокульский, Мохов, 2011). Облачная фракция измеряется в долях единицы. Укажем, что в настоящем исследовании вместо понятия «облачная фракция» будем применять термин «облачность».

Последнее время необычайно возрос интерес к климатическому обобщению данных об облачности. Это объясняется тем, что роль облачности в настоящих климатических изменениях в достаточной степени не определена (Шерстюков, 2008). Адекватными материалами для климатических обобщений становятся спутниковые данные об облачном покрове.

В настоящем исследовании предпринята попытка провести климатологические обобщения облачности в два климатических периода. Один — с 2001 по 2010 г., второй — с 2011 по 2020 г. В эти климатические промежутки рассматривалась облачность в январе и июле. В качестве исходных данных

Алимпиева Мария Александровна — ассистент, аспирант, alimpiewa@rambler.ru
Морозова Светлана Владимировна — доцент, кандидат географических наук
Короткова Надежда Владимировна — доцент, кандидат географических наук

использовались значения облачности (облачные фракции), размещённые на сайте NASA (https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_CLD_FR). Визуализация облачных полей проводилась с помощью программы MapInfo, выбрана интерполяция методом естественного соседа.

В результате статистических расчётов построены средние многолетние поля облачности января и июля за указанные временные промежутки. Цветовые градации указывают на интервалы значений в долях единиц.

На рис. 1 представлены климатические облачные поля для января за выбранные временные интервалы.

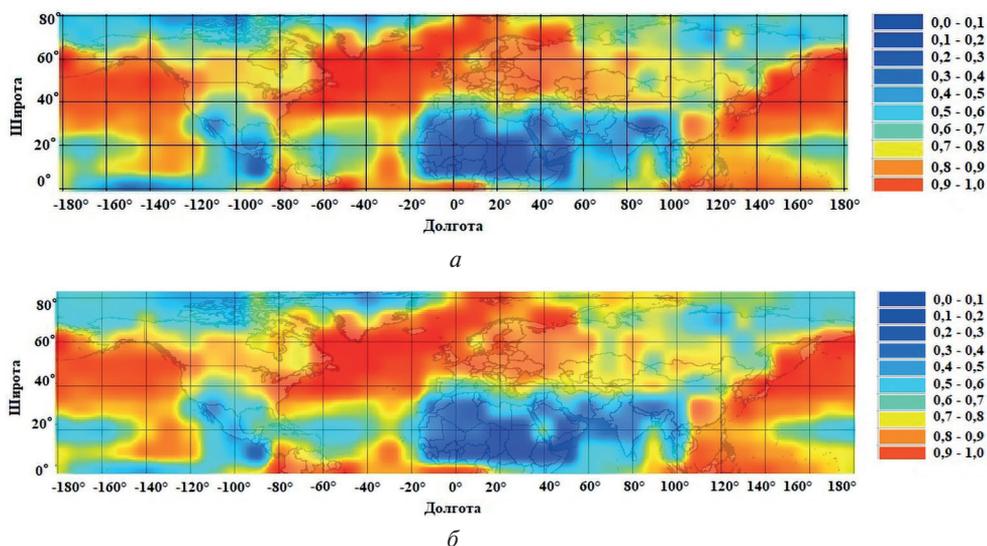


Рис. 1. Среднее многолетнее поле облачности в январе:
а — 2001–2010 гг.; б — 2010–2021 гг.

Как видно на рис. 1, заметные изменения облачного покрова в два исследуемых временных промежутка визуально не обнаруживаются. Облачные районы соответствуют зонам активного циклогенеза. Это полоса между 30 и 60° с. ш. в западном полушарии. Большое количество облаков выявляется в зоне действия атлантической и евроазиатской ветви полярного фронта и атлантической и азиатской ветви арктического фронта, что согласуется с климатическим полем облачности по данным наземных наблюдений (Дроздов и др., 1989).

На климатических полях облачности июля также визуально довольно трудно отследить какие-либо региональные изменения в облачных полях. Максимальное количество облаков отмечается в районе экватора, причём на облачных полях июля хорошо прослеживается динамика внутритропической зоны конвергенции. Малооблачные и безоблачные районы — пустыня Сахара. Большая облачность фиксируется в районе Северной Атлантики и над северной частью Тихого океана (рисунки не приводятся).

Однако математические расчёты разницы в значениях облачности в два исследуемых временных промежутка позволили определить районы, различающиеся количеством облачности. Визуализация этой разницы представлена на рис. 2 и 3. Укажем, что при расчётах разницы в количестве облачности из значений облачности во втором временном интервале (2011–2020) вычитались значения облачности в первом временном интервале (2001–2010).

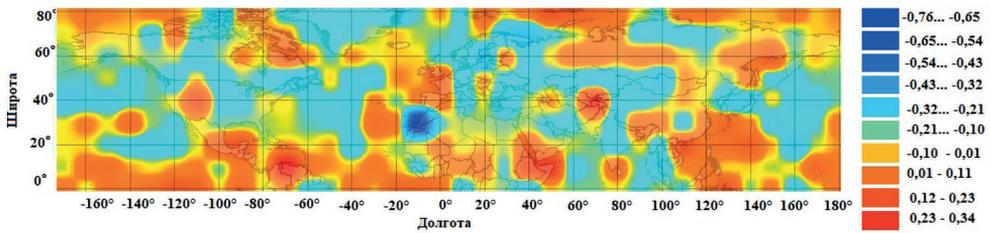


Рис. 2. Разница в значениях облачности между климатическими периодами (январь)

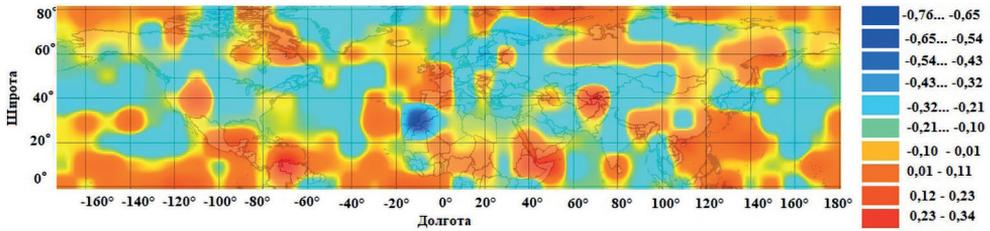


Рис. 3. Разница в значениях облачности между климатическими периодами (июль)

Как видно из рис. 2 и 3, прослеживается очень большая пятнистость в изменчивости облачных полей, причём сами районы пятнистости не велики по масштабу. Поскольку облачность очень тесно связана с формами барического рельефа, можно предположить, что изменение облачности над определёнными географическими районами косвенно отражает функционирование мезомасштабных барических систем в этих районах.

В январе (см. рис. 2) от одного десятилетия к другому в целом облачность увеличилась севернее 70° с. ш. и южнее 20° с. ш. Увеличение количества облачности в январе в полярных широтах можно рассматривать как фактор, способствующий развитию потепления в этой области. Также укажем, что увеличение количества облаков над каким-то определённым районом свидетельствует об усилении циклоничности в нём. Представленные рассуждения авторов согласуются с ранее выполненными исследованиями, например (Нестеров, 2018, 2020), в которых указывается на увеличение повторяемости экстремальных циклонов в полярных районах.

Увеличение облачности от периода к периоду в районе экватора (см. рис. 2) препятствует разогреву этих районов. Отметим, что в широтной зоне между тридцатыми градусами северных и южных широт потепление не отмечается, и чем ближе к экватору, тем сильнее выражен отрицательный тренд временного изменения температуры воздуха (Переведенцев, 2009).

Уменьшение январской облачности от одного климатического периода к другому наблюдается только в узкой широтной зоне, начинающейся от экватора и протягивающейся в северо-восточном направлении почти до пятидесятих широт северного полушария. Эта зона уменьшения количества облаков проходит по восточному побережью Восточной Африки, югу Аравийского полуострова на Центральную Азию. Выявленное уменьшение облачности в этом регионе требует дополнительных исследований. Укажем, что ещё один очаг уменьшения облачности проявился над северо-восточной частью Китая.

Анализ изменения облачности от одного десятилетия к другому в июле (см. рис. 3) позволил заключить, что увеличение количества облаков так же, как и в январе, характерно для зоны, прилегающей к экватору. Увеличение облачности

в этом районе также не способствует росту приповерхностной температуры воздуха в этих широтах. В июле очаг уменьшения облачности очень мал по площади и располагается вблизи западного побережья Африки в районе холодного Канарского течения. Скорее всего, уменьшение облачности в районе холодного течения может указывать на некоторое снижение его температуры. Однако этот факт также требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Дроздов О. А., Васильев В. А., Кобышева Н. В.* Климатология: учеб. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 568 с.
- Нестеров Е. С.* Экстремальные циклоны в Атлантико-Европейском регионе. М.: Гидрометеорол. научно-исслед. центр РФ, 2018. 104 с.
- Нестеров Е. С.* Полярные циклоны: наблюдения, реанализ, моделирование // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 65–82. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-65-82>.
- Переведенцев Ю. П.* Теория климата. Казань: Казан. гос. ун-т. 2009. 505 с.
- Чернокульский А. В.* Ночная и дневная облачность по разным спутниковым данным // Изв. РАН. Сер. географ. 2015. № 6. С. 48–60. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-6-48-60>.
- Чернокульский А. В., Мохов И. И.* Сравнительный анализ данных по количеству облаков // Взаимодействие полей и излучения с веществом: тез. Международ. Байкальской молодеж. науч. шк. по фундам. физике и 12-й Конф. молодых учёных. 2011. С. 353–356.
- Шерстюков Б. Г.* Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: ГУ ВНИИГМИ – МЦД. 2008. 246 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CLIMATIC CLOUD FIELDS IN JANUARY AND JULY IN THE NORTHERN HEMISPHERE BASED ON SATELLITE DATA

M. A. Alimpieva, S. V. Morozova, N. V. Korotkova

Saratov State University (SSU), Saratov, Russia

Based on satellite information on cloudiness, an average long-term cloudiness field was constructed for two decades: 2001–2010 and 2011–2020 in January and July. It has been established that the average climatic fields in January and July reflect well the main climatic patterns of cloud distribution in the Northern Hemisphere. An analysis of changes in cloud fields from one ten-year period to another made it possible to identify areas in which an increase or decrease in cloudiness occurs. In both January and July, there is a tendency for an increase in cloudiness in the equator region. In January, an increase in cloudiness was detected at high latitudes. It is concluded that the increase in cloudiness near the equator does not contribute to the development of warming in this zone. The increase in cloudiness in the polar latitudes in January can be considered as a factor preventing cooling and stimulating the development of warming in the Arctic basin.

Keywords: cloudiness, satellite information, climate change, cloud field variability

Alimpieva Maria Aleksandrovna — assistant professor, postgraduate, alimpiewa@rambler.ru
Morozova Svetlana Vladimirovna — associate professor, candidate of geographic sciences
Korotkova Nadezhda Vladimirovna — associate professor, candidate of geographic sciences

МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ВЕНЕРЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЗЕМЛИ PREM

Д. О. Аморим¹, Т. В. Гудкова²

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия

² Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

Изучение недр Венеры имеет ключевое значение для понимания эволюции и геологической истории планеты. В работе построены 72 модели внутреннего строения Венеры на основе модели Земли PREM. Модели отличаются мощностью коры, радиусом и плотностью ядра. Для каждой из них рассчитаны распределение плотности, давления, массы, гравитационного ускорения и скорости сейсмических волн по радиусу, а также вычислены момент инерции I и приливное число Лява k_2 . Полученные результаты были сопоставлены с имеющимися оценками I и k_2 . Анализ моделей позволяет заключить, что присутствие твёрдого внутреннего ядра на Венере маловероятно, и что модели с радиусом ядра в интервале от 3000 до 3400 км — более правдоподобные.

Ключевые слова: Венера, землеподобная модель внутреннего строения, момент инерции, приливное число Лява, неупругость

ВВЕДЕНИЕ

Исследование внутреннего строения планет земной группы весьма важно, ведь процессы, происходящие в их недрах, тесно связаны с эволюцией планет и частично объясняют, почему они так различаются между собой. Венера представляет особый интерес, так как её масса и радиус близки к земным, а её атмосфера и геологическая история — нет.

Внутреннее строение Венеры недостаточно изучено из-за высокой погрешности измерения момента инерции и числа Лява k_2 . С целью уточнения значений этих параметров разрабатываются миссии по исследованию Венеры: проект Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» «Венера-Д», проект Европейского космического агентства EnVision и проект Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США VERITAS (*англ.* Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy). Тем не менее, имеющиеся данные о моменте инерции (Margot et al., 2021) и о приливном числе Лява k_2 (Konopliv, Yoder, 1996) позволяют выделить некоторую «группу» моделей, которые с большей вероятностью описывают реальные условия в недрах Венеры.

ЗЕМЛЕПОДОБНЫЕ МОДЕЛИ ВЕНЕРЫ

Для построения модели внутреннего строения планеты необходимо задать уравнение состояния вещества в мантии и ядре. Из-за отсутствия сейсмических измерений на Венере неизвестно распределение модулей сдвига и всестороннего сжатия по радиусу r . Без этих зависимостей невозможно использовать уравнение Адамса — Вильямсона для получения профиля плотности в недрах.

Даржилян Оливейра Аморим — студент бакалавриата, oliveira.ad@phystech.edu

Тамара Васильевна Гудкова — главный научный сотрудник,
доктор физико-математических наук

В связи с тем что Земля и Венера схожи по радиусу и по массе, в данной работе считается, что составы и условия в их недрах близки, что позволяет использовать данные из земной модели PREM (*англ.* Preliminary Reference Earth Model) (Dziewonski, Anderson, 1981) как нулевое приближение. Используются зависимости плотности от давления $\rho_0(P)$ и модулей сдвига $\mu_0(\rho)$ и всестороннего сжатия $K_0(\rho)$ от плотности. Проводится интерполяция данных из модели PREM, а при необходимости их экстраполяция в нижней мантии или в верхней части ядра.

В работе (Жарков, Засурский, 1982) при построении моделей Венеры считается, что толщина коры равна 70 км. В последние годы, на основе данных топографии и гравитационного поля, это значение пересмотрено в сторону уменьшения (Jimenez-Diaz et al., 2015). В настоящей работе построены модели, в которых мощность коры равна 30, 50 и 70 км. Плотность в коре принята равной $2800 \text{ кг}\cdot\text{см}^{-3}$.

Что касается ядра, в настоящей работе предполагается, что оно находится полностью в жидком состоянии. В работе (Dumoulin et al., 2017) показано, что на основе имеющихся данных невозможно точно утверждать, имеется ли твёрдое внутреннее ядро у Венеры. В указанной работе построены модели с твёрдым ядром, которые удовлетворяют наблюдаемым геофизическим данным. Однако в таких моделях ядро состоит из чистого железа, что маловероятно, так как считается, что в ядрах планет земной группы присутствуют примеси лёгких элементов. Эти примеси заметно снижают температуру плавления вещества в ядре. В настоящей работе считается, что состав ядра Венеры слабо отличается от состава земного ядра. Ниже будет показано, что, если такое предположение верно, то ядро находится в жидком состоянии. Рассматриваются модели с радиусом ядра R_c в интервале от 2800 км до 3500 км.

Здесь используется подход из работы (Гудкова, Жарков, 2020) — плотность в мантии $\rho_m(P)$ задана с помощью коэффициента A : $\rho_m(P) = A\rho_0(P)$. Тем самым она определяется смещением базовой плотности из PREM вверх или вниз.

Неизвестно, содержит ли ядро Венеры больше или меньше примесей лёгких элементов по сравнению с Землёй, поэтому, для плотности ядра $\rho_c(P)$ вводится аналогичный коэффициент B : $\rho_c(P) = B\rho_0(P)$. Построены модели для трёх значений B : 0,99; 1,00; 1,01.

Расчёт моделей внутреннего строения планет основан на использовании уравнения для массы (1) и уравнения гидростатического равновесия (2):

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(P), \quad (1)$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = -g(r)\rho(P) = -\frac{GM(r)}{r^2}\rho(P). \quad (2)$$

После обезразмеривания, уравнения (1) и (2) решаются методом Рунге–Кутты 4-го порядка аппроксимации. Для каждой модели заданы значения толщины коры, радиуса ядра и коэффициента B и необходимо найти значение коэффициента A , при котором масса модельной планеты совпадает с массой Венеры $M = 4,8669 \cdot 10^{24}$ кг. Для этого используется метод Ньютона.

Всего построены 72 модели: толщина коры — 30, 50 и 70 км; радиус ядра — 2800, 2900, 3000, 3100, 3200, 3300, 3400 и 3500 км; коэффициент B — 0,99; 1,00 и 1,01.

Важным геофизическим параметром, накладывающим ограничение на модель планеты, представляется момент инерции, который для всех моделей рассчитывается по формуле (3):

$$I = \frac{1}{MR^2} \cdot \frac{8\pi}{3} \int_0^R \rho(r)r^4 dr. \quad (3)$$

Значение момента инерции Венеры экспериментально определено в работе (Margot et al., 2021) и составляет $0,337 \pm 0,024$.

Для всех моделей также получены распределения модулей сдвига μ и всестороннего сжатия K по радиусу на основе зависимостей из PREM $\mu_0(\rho)$ и $K_0(\rho)$. Эти распределения используются для расчёта скоростей сейсмических волн и числа Лява k_2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Распределения плотности и давления представляют особый интерес для определения состояния ядра (твёрдое или жидкое), поэтому для всех моделей приведены (рис. 1) полученные модельные значения плотности и давления в центре планеты (соответственно ρ_c и P_c). В моделях с большим ядром ρ_c и P_c выше, чем в моделях с маленьким ядром. Толщина коры, в свою очередь, слабо влияет на эти величины.

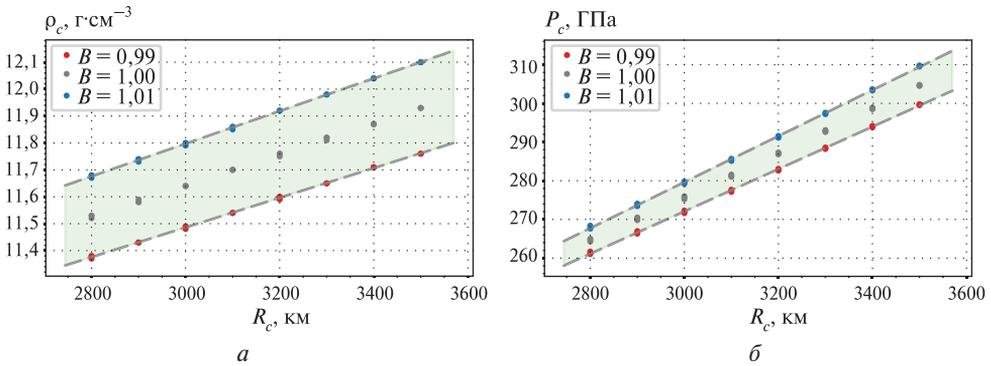


Рис. 1. Модельные значения плотности ρ_c (а) и давления P_c (б) в центре Венеры

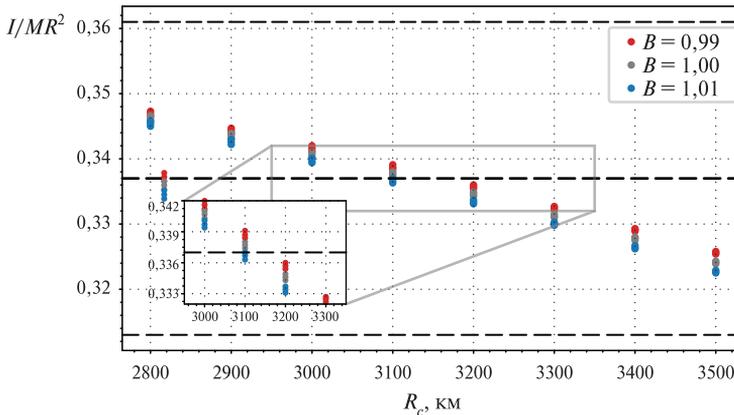


Рис. 2. Модельные значения момента инерции Венеры. Штриховые линии выделяют область $0,337 \pm 0,024$

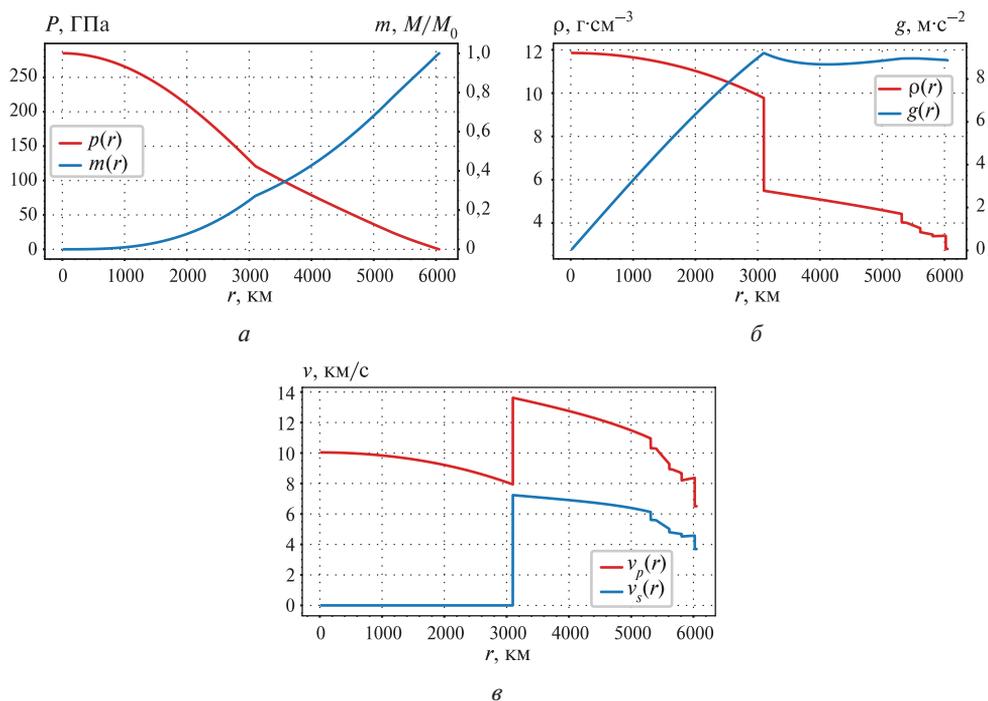


Рис. 3. Распределения давления и массы (а), плотности и гравитационного ускорения (б) и скорости (в) сейсмических волн по радиусу для модели с толщиной коры 30 км, $B = 1,01$ и $R_c = 3100$ км

Модельные значения P_c находятся в интервале от 260 до 310 ГПа. Для сравнения: в центре Земли давление достигает 363 ГПа, а на границе внутреннего ядра — 328 ГПа (Dziewonski, Anderson, 1981). Это показывает, что даже в моделях с очень большим ядром давление в центре Венеры не достигает значений, при которых происходит кристаллизация расплава в земных условиях. Следовательно, если составы Венеры и Земли близки, то твёрдого внутреннего ядра у Венеры нет.

Что касается момента инерции, получены значения (рис. 2) в интервале от 0,323 до 0,347. Это согласуется с измеренным значением $0,337 \pm 0,024$ (Margot et al., 2021). Ближе всего к центральному значению 0,337 находятся модели с радиусом ядра R_c от 3000 до 3300 км.

У модели с толщиной коры 30 км, $B = 1,01$ и $R_c = 3100$ км значение момента инерции точно равно 0,337. Для этой модели на рис. 3 приведены профили важнейших физических величин в недрах Венеры.

Из-за высокой погрешности измерения момента инерции Венеры невозможно выбрать, какие модели наиболее подходящие. Нужен ещё один критерий для сравнения моделей. В качестве такого критерия можно использовать приливное число Лява k_2 .

ПРИЛИВНОЕ ЧИСЛО ЛЯВА k_2

В работе (Love, 1909) введены два геофизических параметра (h_2 и k_2), описывающих отклик планеты на внешнее приливное воздействие. Сегодня эти числа

активно используются для получения информации о недрах планет и спутников Солнечной системы. Для Венеры k_2 измерено и оно составляет $0,295 \pm 0,066$ (Konopliv, Yoder, 1996).

На основе подхода, предложенного в статье (Alterman et al., 1959), рассчитано упругое число Лява k_2 для всех построенных моделей Венеры. Полученные значения приведены на рис. 4.

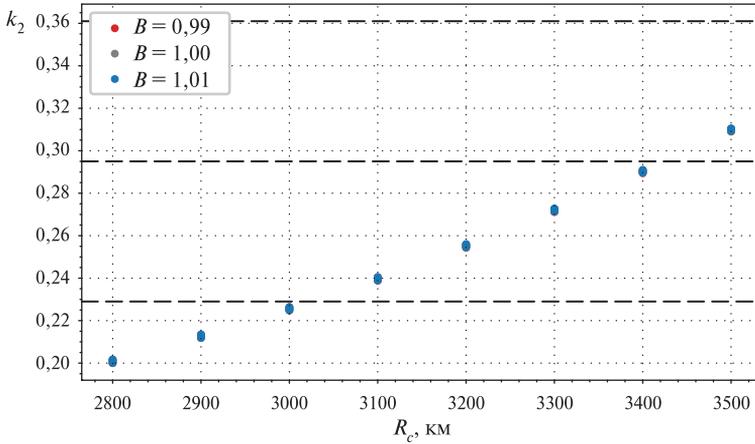


Рис. 4. Модельные значения упругого числа Лява k_2 Венеры. Штриховые линии выделяют область $0,295 \pm 0,066$

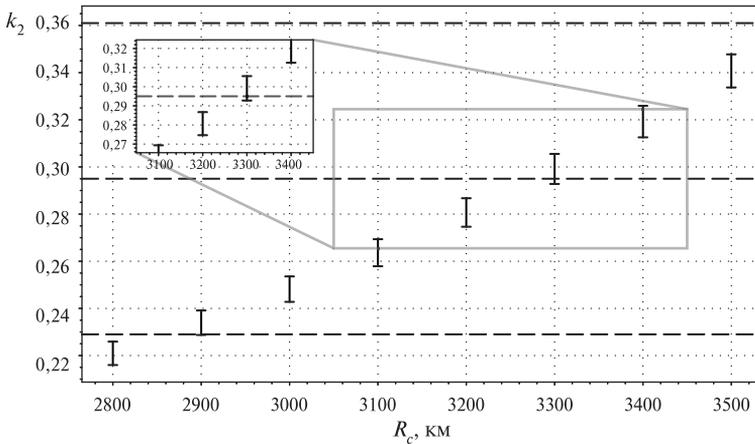


Рис. 5. Модельные значения неупругого числа Лява k_2 Венеры. Штриховые линии выделяют область $0,295 \pm 0,066$

На рис. 4 видно, что параметр B и мощность коры слабо влияют на k_2 , и главную роль играет радиус ядра R_c . Модели с радиусом, меньше 3100 км не попадают в область $0,295 \pm 0,066$ и поэтому маловероятны. Ближе всего к центральному значению находятся модели с очень большим ядром. Это не очень хорошо согласуется с выводом, сделанным на основе модельных значений момента инерции, и объясняется тем, что при расчёте числа Лява на рис. 4 не была учтена неупругость планеты.

В публикациях (Гудкова, Жарков, 2020; Dumoulin et al. 2017) показано, что из-за большого периода солнечного прилива на Венере необходимо учитывать диссипацию в недрах планеты. Для этого предлагаются разные реологии, в которых модуль сдвига становится комплексной величиной. В работе (Гудкова, Жарков, 2020) получено, что из-за эффектов неупругости k_2 может увеличиться на 8–12 %. В связи с этим ранее полученные упругие значения k_2 следует поправить (рис. 5).

С учётом эффектов неупругости выводы о моделях внутреннего строения Венеры заметно изменяются. Теперь исключить можно только модели с радиусом ядра 2800 км, а более подходящими по критерию числа Лява стали модели с $R_c = 3100\text{--}3400$ км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан метод построения моделей внутреннего строения Венеры на основе земной модели PREM. Анализ полученных результатов по моменту инерции и приливному числу Лява k_2 позволяет заключить, что присутствие внутреннего твёрдого ядра на Венере маловероятно, и что более подходящими представляются модели с радиусом ядра в интервале от 3000 до 3400 км.

Разработанные алгоритм и программы позволяют лучше определить внутреннее строение Венеры, когда будут доступны более точные измерения момента инерции и приливного числа Лява.

ЛИТЕРАТУРА

- Гудкова Т. В., Жарков В. Н. Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы*. 2020. Т. 54. № 1. С. 24–32.
- Жарков В. Н., Засурский И. Я. Физическая модель Венеры // *Астрон. вестн.* 1982. Т. 16. № 1. С. 18–28.
- Alterman Z., Jarosch H., Pekeris C. L. Oscillations of the Earth // *Proc. Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1959. V. 252. Iss. 1268. P. 80–95.
- Dumoulin C., Tobie G., Verhoeven O., Rosenblatt P., Rambaux N. Tidal constraints on the interior of Venus // *J. Geophysical Research: Planets*. 2017. V 122. Iss. 6. P. 1338–1352. DOI: 10.1002/2016JE005249.
- Dziewonski A. M., Anderson D. L. Preliminary reference Earth model // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1981. V 25. Iss. 4. P. 297–356.
- Jiménez-Díaz A., Ruiz J., Kirby J. F., Romeo I., Tejero R., Capote R. Lithospheric structure of Venus from gravity and topography // *Icarus*. 2015. V. 260. P. 215–231.
- Konopliv A. S., Yoder C. F. Venusian k_2 tidal Love number from Magellan and PVO tracking data // *Geophysical Research Letters*. 1996. V. 23. Iss. 14. P. 1857–1860.
- Love A. E. H. The yielding of the Earth to disturbing forces // *Proc. Royal Society of London. Series A. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1909. V. 82. Iss. 551. P. 73–88.
- Margot J. L., Campbell D. B., Giorgini J. D., Jao J. S., Snedeker L. G., Ghigo F. D., Bonsall A. Spin state and moment of inertia of Venus // *Nature Astronomy*. 2021. V 5. Iss. 7. P. 676–683.

PREM-BASED MODELS OF VENUS' INTERIOR STRUCTURE

D. O. Amorim¹, T. V. Gudkova²

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS (IPE RAS), Moscow, Russia

A better understanding of Venus's internal structure is crucial to comprehending the planet's evolution and geologic history. In this work we have built 72 PREM-based models of Venus, which differ in crustal thickness, mantle and core densities and core radius. Their pressure, mass, density and seismic velocities profiles have been calculated, as well as their moment of inertia I and tidal Love number k_2 . The results were compared to the available estimates of I and k_2 . We found that the presence of an inner solid core can be ruled out if Venus' composition is indeed similar to Earth's, and that a core with a radius in the range of 3000 to 3400 km is preferable to smaller ones.

Keywords: Venus' interior, core state, tidal Love number, inelasticity

Amorim Dargilan Oliveira — undergraduate student, oliveira.ad@phystech.edu

Gudkova Tamara Vacilevna — chief researcher, doctor of physical and mathematical sciences

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СТАНДАРТНОГО НАБОРА ДАННЫХ ATLO8 СПУТНИКОВОГО ЛИДАРА ATLAS/ICESAT-2 ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

М. А. Богодухов, С. А. Барталев, В. О. Жарко

Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН)
Москва, Россия

Стандартный продукт ATLO8 спутниковых лидарных данных ATLAS/ICESat-2 предоставляет информацию о распределении высоты растительности на участках земной поверхности размером 100×14 м. В 2021 г. разработчики модифицировали указанный набор данных, добавив дополнительные параметры, характеризующие высоту леса (включая информацию на уровне отдельных отражённых фотонов) в пределах участков 20×14 м. В статье описаны подходы к предобработке данных ATLO8, направленные на преобразование исходной информации о расположении и распределении высоты участков лесного покрова в векторный формат для дальнейшего геоинформационного анализа. Проведена оценка влияния повышения пространственной детальности лидарных данных на точность оценки средней высоты леса на основе сравнения с результатами наземных измерений характеристик лесного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, высота леса, лидар, ICESat-2, ATLO8

ВВЕДЕНИЕ

Для мониторинга лесов на больших территориях необходимо использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Одной из ключевых характеристик лесного покрова выступает его высота, необходимая для решения ряда прикладных и научных задач, в частности связанных с оценкой бюджета углерода лесов России. Непосредственные измерения высоты объектов земной поверхности, включая получение информации о вертикальной структуре растительности, на больших территориях могут выполняться с использованием спутниковых лидарных (LIDAR, *англ.* Light Detection and Ranging — обнаружение и определение дальности с помощью света) данных.

Стандартный продукт ATLO8 (Neuenschwander et al., 2021) данных спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 (*англ.* Advanced Topographic Laser Altimetry System/Ice, Cloud, and land Elevation Satellite 2) с технологией подсчёта отдельных отражённых фотонов (*англ.* photon counting lidar) предоставляет информацию о распределении высоты лесного покрова на участках земной поверхности размером 100×14 м вдоль трека прибора (далее Сегмент 100 м). В последнем обновлении исходный набор данных был модифицирован разработчиками — добавлен дополнительный параметр, характеризующий высоту растительности в пределах участков 20×14 м (далее Сегмент 20 м), что потенциально позволяет проводить её оценку с более высоким уровнем пространственной детальности. Кроме того, указанные модификации обеспечивают возможность получения для каждого

Богодухов Михаил Анатольевич — инженер, лаборант-исследователь, аспирант, bogodukhov.ma@phystech.edu

Барталев Сергей Александрович — главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, доктор технических наук, bartalev@d902.iki.rssi.ru

Жарко Василий Олегович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, zharko@d902.iki.rssi.ru

фотона, зафиксированного прибором, информации о высоте отразившего его растительного элемента в пределах Сегментов 20 м.

В настоящей работе дано краткое описание методов предварительной обработки стандартного продукта ATL08, направленных на преобразование исходной информации о координатах и распределении высоты лесного покрова Сегментов в векторный формат для дальнейшего геоинформационного анализа. Также приведены результаты оценки влияния повышения пространственной детальности указанных продуктов обработки лидарных данных на точность оценки средней высоты лесного покрова на основе сравнения с результатами наземных измерений на уровне таксационных выделов.

СТАНДАРТНЫЙ ПРОДУКТ ATL08 СПУТНИКОВЫХ ЛИДАРНЫХ ДАННЫХ ATLAS/ICESAT-2

Спутниковая система активного дистанционного зондирования ATLAS/ICESat-2 испускает лазерные импульсы с высокой частотой и детектирует отдельные фотоны, отражённые объектами земной поверхности. Измерение времени полёта фотонов совместно с информацией о положении и ориентации прибора позволяет рассчитать координаты отражающих объектов, в том числе их высоту.

Размер футпринта (*англ.* footprint) прибора составляет порядка 14 м, а смещение футпринтов между двумя последовательными импульсами — около 70 см. Полученные при выполнении измерений вдоль трека координаты отражающих объектов формируют облако точек, которое используется для дальнейшего анализа. Иллюстрация облака точек вдоль трека с растительностью представлена на рис. 1.

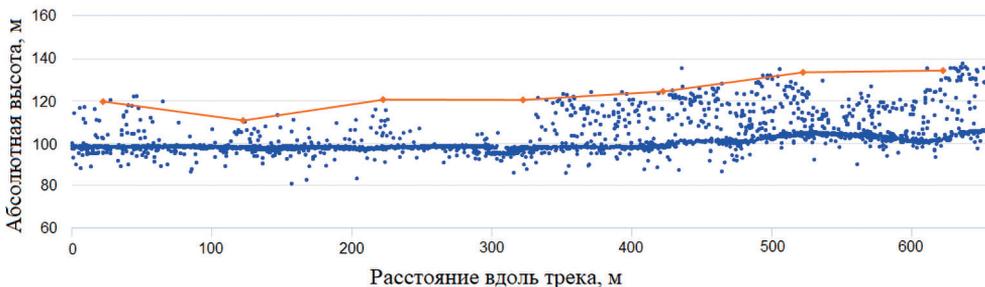


Рис. 1. Пример облака точек, получаемого вдоль трека спутниковой системой ATLAS/ICESat-2 для покрытой лесом территории. Чётко виден уровень подстилающей поверхности; точки выше этого уровня соответствуют элементам растительности. Оранжевыми точками указаны значения 98-го перцентиля высоты растительности в Сегментах 100 м (адаптировано с сайта <https://openaltimetry.org/data/icesat2/elevation>)

Стандартный набор данных ATLAS ATL08 формируется на основе разделения облака точек на классы: шум, крона деревьев, верхний полог и подстилающая поверхность. Непрерывный трек шириной 14 м разделяется на Сегменты 100 м, каждый из которых содержит информацию о высоте растительности относительно поверхности: минимальная, максимальная, средняя и перцентили высот, а также различные дополнительные параметры. В последнем обновлении продукта ATL08 разработчиками был добавлен дополнительный

параметр h_{canopy_20} , содержащий информацию о 98-м перцентиле высоты растительности для 5 Сегментов 20 м в пределах Сегмента 100 м.

Поскольку использованные данные ATLO8 содержат информацию только о координатах центров Сегментов, для дальнейшего геоинформационного анализа лидарных данных были построены векторные полигоны их границ. Реализованный метод построения полигонов включал в себя следующую последовательность геопространственных операций: 1) объединение координат центров Сегментов в трек; 2) построение полигона буферной зоны трека радиусом 7 м; 3) построение полигонов буферных зон центров Сегментов радиусом 50 или 10 м; 4) пространственное пересечение полигонов буферных зон трека и центров Сегментов. Полученные полигоны пересечений буферных зон принимались в качестве границ Сегментов.

СРАВНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ОЦЕНОК СРЕДНЕЙ ВЫСОТЫ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ATLAS ATLO8 С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА УРОВНЕ ТАКСАЦИОННЫХ ВЫДЕЛОВ

В рамках данной работы в качестве параметра, характеризующего высоту леса по данным ATLO8, использовалась величина h_{canopy} — 98-й перцентиль высот растительности в Сегменте. Выбранная характеристика распределения высоты леса показала наиболее высокий уровень согласованности с наземными данными в ранее проведённых исследованиях. Сравнивались средняя величина указанного параметра по спутниковым оценкам и средняя высота верхнего яруса леса по данным наземных измерений. Были использованы лидарные измерения за период с 15.10.2018 по 15.03.2022 для тестового участка на территории двух административных районов Костромской области.

Сравнение продуктов обработки данных ATLO8 с результатами наземных измерений проводилось на уровне таксационных выделов. Сегмент считался принадлежащим к таксационному выделу, если его центр находился в пределах выдела. Сегменты, для которых в исходных данных отсутствовал параметр h_{canopy} (в силу недостаточного количества фотонов для оценки высоты леса), а также имеющие явно нехарактерные значения указанного параметра: менее 1,6 и более 50 м, были исключены из анализа. При этом данные критерии применялись независимо, и Сегмент 20 м мог быть отфильтрован, даже если включающий его Сегмент 100 м участвовал в сравнении.

Далее рассмотрены примеры влияния повышения пространственной детальности продуктов обработки лидарных данных ATLAS ATLO8 на точность оценки высоты леса. Использование Сегментов 20 м ожидаемо демонстрирует лучшие результаты при оценке высоты участков лесного покрова, имеющих сложную форму и/или неоднородности (рис. 2). Здесь и далее жёлтым цветом обозначены границы выделов, красным и синим — границы Сегментов 100 м и 20 м соответственно, в качестве фона приведены снимки сверхвысокого разрешения в естественных цветах. Повышение пространственной детальности позволяет получить больше спутниковых измерений непосредственно в пределах рассматриваемого участка леса, а также отразить имеющуюся неоднородность высоты.

На рис. 3 приведены примеры оценки высоты молодых насаждений, возможно восстанавливающихся после нарушений. Характерная особенность таких участков лесного покрова — значительная разница высот с окружающим лесом. Несмотря на то, что большая часть Сегментов 100 м лежит полностью внутри выделов, использование лидарных данных такой детальности приводит к значительной переоценке высоты относительно наземных измерений. Отчасти это

также связано с используемым параметром, так как 98-й перцентиль высот растительности характеризует скорее максимальную высоту леса (с учётом шумов), и случайное попадание даже одного нехарактерно высокого дерева в Сегмент может значительно завесить оценку. Использование Сегментов 20 м позволяет увеличить количество измерений, корректно характеризующих высоту леса в выделе, и получить более близкие к наземным данным оценки.

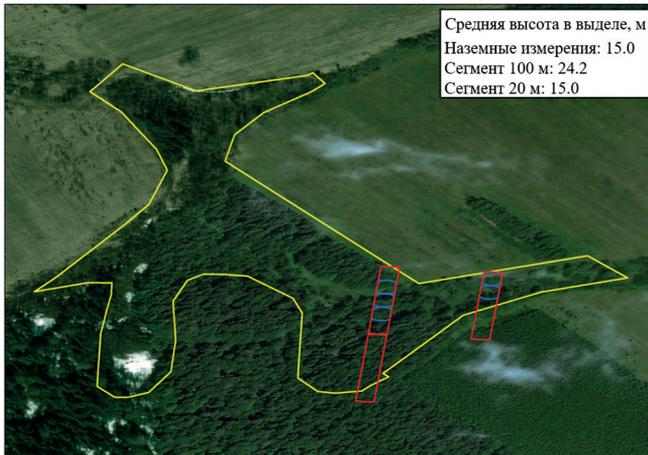


Рис. 2. Пример оценки высоты леса для таксационного выдела сложной формы с неоднородными участками

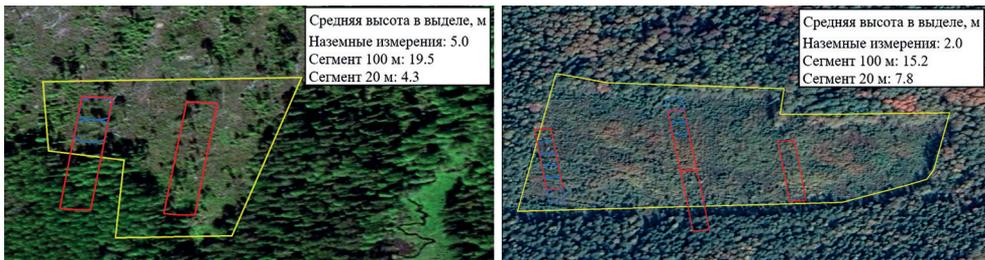


Рис. 3. Примеры оценки высоты восстанавливающегося лесного покрова

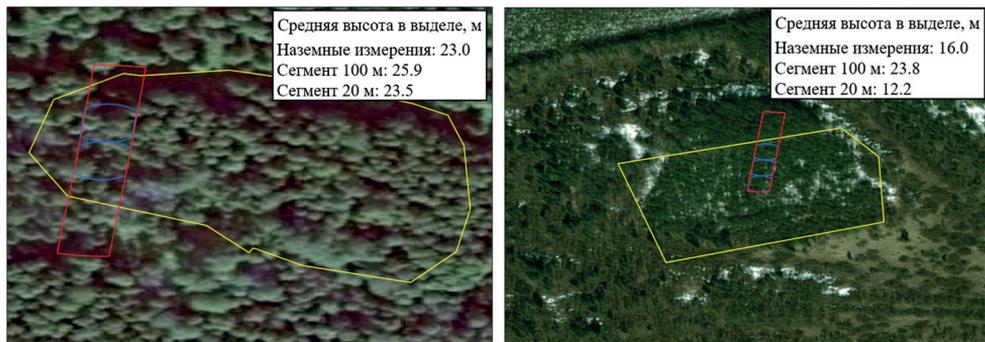


Рис. 4. Примеры оценки высоты для небольших однородных таксационных выделов правильной формы

Сегменты 20 м также демонстрируют преимущество при оценке высоты однородных участков лесного покрова правильной формы, но небольшой площади (рис. 4). В этом случае повышенный уровень пространственной детальности также позволяет получить больше лидарных измерений в пределах рассматриваемого выдела, что обеспечивает возможность более точной оценки высоты по сравнению с использованием Сегментов 100 м.

При этом использование лидарных данных на уровне Сегментов 20 м для оценки высоты леса не всегда демонстрирует лучшую согласованность с данными наземных измерений, чем Сегменты 100 м (рис. 5). Даже в случае неоднородных участков лесного покрова сложной формы наличие большого количества спутниковых измерений на уровне Сегментов 100 м может позволить получить более близкую к наземным данным оценку (см. рис. 5, слева). Аналогичная ситуация наблюдается для однородных выделов большого размера (см. рис. 5, справа сверху). Это может быть связано с тем, что Сегменты 100 м имеют более точные значения параметра h_{canopy} за счёт большего числа фотонов, используемых для оценки, при условии однородной высоты леса в Сегменте.

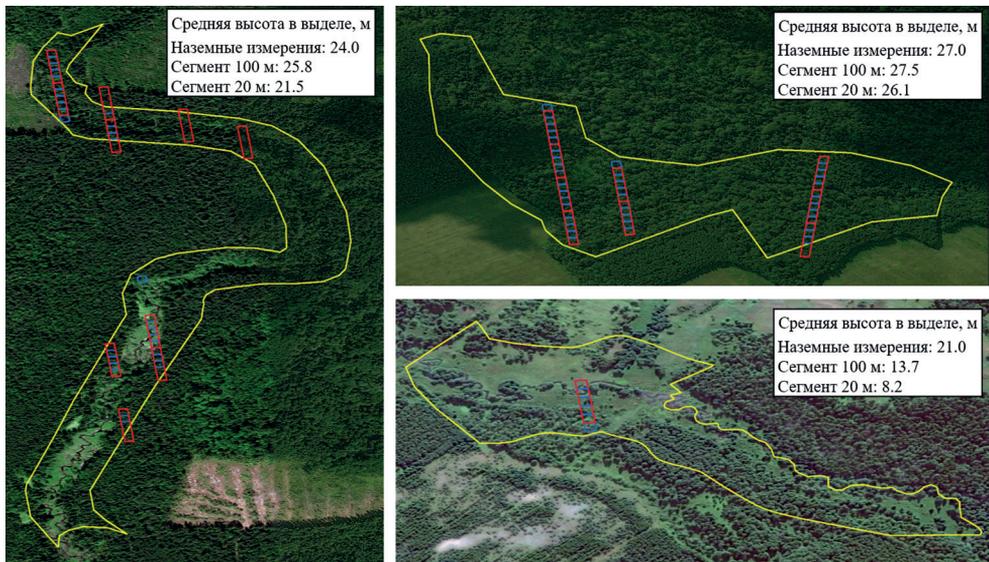


Рис. 5. Примеры оценок высоты леса, для которых повышение уровня пространственной детальности не приводит к увеличению точности

В то же время недостаточное количество лидарных измерений при оценке высоты большого неоднородного участка лесного покрова сложной формы в любом случае приводит к значительным отклонениям от наземных измерений (см. рис. 5, справа внизу).

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Повышение пространственной детальности спутниковых лидарных данных ATLAS/ICESat-2 ATL08 до уровня Сегментов 20 м обеспечивает точность оценки высоты лесного покрова не хуже, чем использование Сегментов 100 м, а в ряде случаев позволяет получить более близкие к результатам наземных измерений

оценки. Улучшенное пространственное разрешение позволяет анализировать участки лесного покрова сложной формы и/или небольшого размера, используя спутниковые лидарные измерения, полученные непосредственно в пределах территории объекта исследования.

При этом компактная форма Сегмента 20 м потенциально позволяет пропустить этап предобработки данных ATL08, направленный на построение полигонов границ Сегментов, и использовать эти данные как точечные измерения. Размер Сегмента 20 м обеспечивает возможность совместного использования указанных лидарных данных с оптическими данными ДЗЗ среднего/высокого пространственного разрешения (10–30 м, Landsat/Sentinel-2) и продуктами их обработки.

Использование данных ATL08 на уровне Сегментов 20 м также позволяет получить для каждого фотона, зафиксированного прибором, информацию о высоте отразившего его растительного элемента, т.е. выполнять обработку лидарных данных на уровне исходного облака точек (см. рис. 1), поскольку координаты отдельных фотонов в рассматриваемом продукте даны в привязке к Сегменту 20 м. Это обеспечивает потенциальную возможность расчёта пользовательских характеристик лесного покрова, таких как, например, средняя высота верхнего полога (что ближе к традиционным наземным измерениям высоты леса, чем 98-й перцентиль) или его сомкнутость (как долю фотонов, отражённых кронами деревьев, от их общего числа).

К недостаткам использования Сегментов 20 м продукта ATL08 можно отнести меньшее число фотонов, доступное для оценки параметров распределения высоты растительности, чем в Сегментах 100 м, что может привести к снижению её точности или к отсутствию соответствующих данных.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 19-77-30015 «Разработка методов и технологии комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для развития системы национального мониторинга бюджета углерода лесов России в условиях глобальных изменений климата». Обработка данных ДЗЗ в рамках проведённых исследований выполнялась с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

ЛИТЕРАТУРА

- Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурицев М. А., Кашицкий А. В., Балашиов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Neuenschwander A. L., Pitts K. L., Jolley B. P., Robbins J., Klotz B., Popescu S. C., Nelson R. F., Harding D., Pederson D., Sheridan R. ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 5: User Guide. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021. ATL08. 19 p. <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL08.005>.

EVOLUTION OF ATLAS/ICESAT-2 ATL08 STANDARD DATA PRODUCT PREPROCESSING METHODS FOR FOREST HEIGHT ESTIMATION

M. A. Bogodukhov, S. A. Bartalev, V. O. Zharko

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

Center of Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow, Russia

Standard ATLAS/ICESat-2 ATL08 lidar satellite data product provides information on the distribution of vegetation height over 100×14 m sites. In 2021 ATL08 product developers modified it adding new parameters describing forest height over smaller 20×14 m sites, including information at the level of individual reflected photons. This report describes approaches for ATL08 data pre-processing aimed at conversion of input ATL08 information on forest sites' location and height distribution into vector format for further GIS analysis. An estimation of impact of improved level of spatial detail on mean forest height estimation accuracy based on comparison with field measurements is presented.

Keywords: Remote sensing, canopy height, lidar, ICESat-2, ATL08

Bogodukhov Mikhail Anatolyevich — engineer, research laboratory assistant, postgraduate, bogodukhov.ma@phystech.edu

Bartalev Sergey Aleksandrovich — chief researcher, head of laboratory, doctor of engineering sciences, bartalev@d902.iki.rssi.ru

Zharko Vasily Olegovich — researcher, candidate of physical and mathematical sciences zharko@d902.iki.rssi.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРИБЛИЖЕНИИ ТОНКОГО СЛОЯ

О. П. Воробьев, А. С. Петросян

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия
Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

Рассматривается тонкий сферический слой жидкости в трёхмерной сферической системе с вращением. Динамика течения в условиях устойчивой стратификации описывается с помощью уравнений Буссинеска в приближении тонкого слоя. Для численного моделирования использованных уравнений разработан спектральный метод, в основе которого лежит разложение неизвестных по полным системам функций в горизонтальном и вертикальном направлениях. Выполнено моделирование трёхмерной затухающей турбулентности, исследовано влияние вращения на устойчиво стратифицированные турбулентные течения. Представлены спектры кинетической энергии как для системы с вращением, так и для системы без вращения.

Ключевые слова: турбулентность, устойчивая стратификация

Система уравнений Буссинеска во вращающейся системе отсчёта может быть представлена в следующем виде:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0,$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\nabla P}{\rho_0} - \alpha T \vec{g} + 2\vec{v} \times \vec{\Omega} + \nu \nabla^2 \vec{v},$$

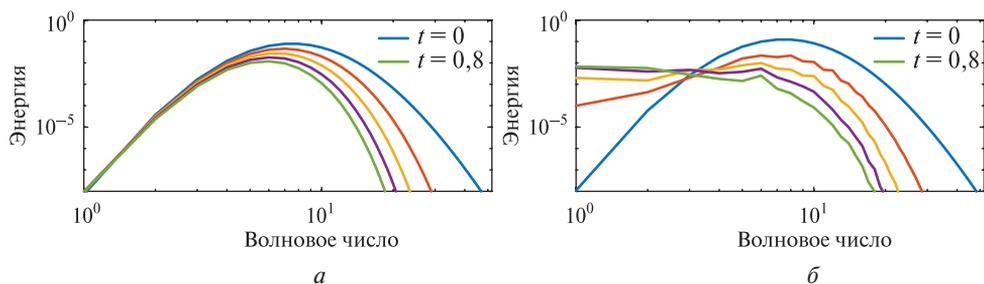
$$\frac{dT}{dt} + \beta v_r = \kappa \nabla^2 T,$$

где $d/dt \equiv \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \nabla$. Приняты следующие обозначения: \vec{v} — это скорость жидкости; ρ_0 — средняя плотность; T и P — возмущения температуры и плотности относительно средних T_0 и P_0 , вызванные движением жидкости; $\vec{g} = g\vec{e}_r$ — ускорение свободного падения; $\vec{\Omega}$ — угловая скорость вращения системы координат; α — коэффициент теплового расширения; β — субадиабатический температурный градиент; $v_r = \vec{v} \cdot \vec{e}_r$ — вертикальная скорость. Уравнения рассматриваются в сферической системе координат с применением приближения тонкого слоя (Miesch, 2001). Выбраны граничные условия, соответствующие изотермическим, непроницаемым и свободным от тангенциальных напряжений границам слоя.

В основе численного метода лежит разложение переменных по полной системе сферических функций в горизонтальных направлениях, а также разложение по полиномам Чебышева в вертикальном направлении. Такой подход позволяет аналитически выразить все частные производные. Дискретизация по времени достигается с помощью смешанной полуявной схемы: для линейных членов применяется неявная схема Кранка — Николсона, для нелинейных используется явный метод Адамса — Башфорта (Clune et al., 1999). Для реализации метода разработан оригинальный код в программной среде MatLab. Все вычисления выполнены на сетке с разрешением $256 \times 128 \times 30$ по широте, долготе и радиусу соответственно.

Воробьев Олег Павлович — студент магистратуры, vorobev.op@phystech.edu

Петросян Аракек Саркисович — профессор, доктор физико-математических наук



Эволюция спектров энергии для случая без вращения (а) и с вращением (б)

Рисунок иллюстрирует эволюцию спектра горизонтальной кинетической энергии при моделировании затухающей турбулентности с вращением системы отсчёта и без вращения. Для каждого случая проводилось пять численных экспериментов с почти идентичными параметрами, изменялось только число, используемое для инициализации генератора случайных чисел. Спектры на графиках представляют собой среднее из всех экспериментов. На рисунке видно, что при наличии вращения на начальных этапах моделирования кинетическая энергия на небольших волновых числах увеличивается благодаря обратному каскаду. Аналогичный эффект наблюдается и для случая без вращения, хотя и в меньшей степени. На более поздних временах энергия монотонно затухает на всех волновых числах независимо от скорости вращения.

ЛИТЕРАТУРА

- Miesch M. S.* Numerical modeling of the solar tachocline. I. Freely evolving stratified turbulence in a thin rotating spherical shell // *The Astrophysical J.* 2001. V. 562. No. 2. P. 1058–1075. DOI: 10.1086/323527.
- Clune T. C., Elliott J. R., Miesch M. S., Toomre J., Glatzmaier G. A.* Computational aspects of a code to study rotating turbulent convection in spherical shells // *Parallel Computing.* 1999. V. 25. No. 4. P. 361–380. [https://doi.org/10.1016/S0167-8191\(99\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8191(99)00009-5).

NUMERICAL MODELING OF STABLY-STRATIFIED TURBULENCE UNDER THE THIN-SHELL APPROXIMATION

O. P. Vorobyev, A. S. Petrosyan

Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia
Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

A thin spherical fluid layer in a three-dimensional rotating spherical system is considered. Fluid dynamics under the stable stratification is modeled using Boussinesq equations under the thin-shell approximation. For the numerical simulation of the equations used, a spectral method based on the expansion of the unknowns into complete sets of functions in vertical and horizontal directions is developed. Numerical simulations of the three-dimensional free evolving turbulence are carried out, effects of stratification on stably-stratified turbulent flows are studied. Kinetic energy spectra for both rotating and nonrotating systems are presented.

Keywords: turbulence, stable stratification

Vorobev Oleg Pavlovich — master's degree student, vorobev.op@phystech.edu

Petrosyan Arakel Sarkisovich — professor, doctor of physical and mathematical sciences

ОЦЕНКА СОСТАВА И МАССЫ ЛЕДЯНОЙ КОМПОНЕНТЫ В ПЕРВИЧНЫХ КАМЕННО-ЛЕДЯНЫХ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЯХ ОКОЛОСОЛНЕЧНОГО ДИСКА

Е. А. Генералова, В. А. Дорофеева

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)
Москва, Россия

Оценён состав льдов и тугоплавкой компоненты в различных регионах солнечной небулы. Получены максимальные оценки для отношений массы льдов к массе тугоплавкой компоненты для различных регионов. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными измерениями для различных тел Солнечной системы, в частности, Цереры, спутников Юпитера и комет. Полученные оценки могут быть также использованы для моделирования внутренней структуры и её эволюции спутников и других малых тел Солнечной системы.

Ключевые слова: солнечная небула, каменно-ледяные тела

ВВЕДЕНИЕ

Оценка состава первичных планетезималей важна при моделировании образования, эволюции и внутренней структуры тел Солнечной системы. В этой работе мы оцениваем максимально возможную массовую долю ледяной компоненты в планетезималиях в зависимости от региона их образования, а также состава льдов. Используются методы равновесной термодинамики, распределение температуры и давления в околосолнечной небуле и изменение данных параметров в первые несколько миллионов лет её существования, а также элементный и химический состав небулы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки распределения температуры и давления в ранней солнечной небуле мы использовали квазиэволюционную самосогласованную модель (Макалкин, Дорофеева, 1995, 1996). Результаты показывают, что на финальных стадиях эволюции околосолнечного газо-пылевого диска “snow line” льда воды достигала главного астероидного пояса. Благодаря этому возникли условия для аккумуляции льда воды в телах этого внутреннего региона Солнечной системы.

Подобные расчёты для внутреннего региона небулы вплоть до главного астероидного пояса уже проводились в работе (Lodders, 2003). Полученная там оценка $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}} = 1,7$ выглядит завышенной, так как в расчётах не учитывались кислородсодержащие газы кроме H_2O , особенно CO и CO_2 . Кроме того, состав твёрдой фазы рассматривался идентичным составу EH-хондритов, которые, однако, могли формироваться только в более восстановленных условиях: $\text{C/O} \sim 0,85 - 1$ (Dorofeeva et al., 1982).

Мы оценили возможное отношение массы воды к массе тугоплавкой компоненты $\left\{ M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}} \right\}$, которая для внутренней части околосолнечной небулы

Генералова Елизавета Антоновна — младший научный сотрудник, аспирант, lisa.generalova@yandex.ru

Дорофеева Вера Алексеевна — главный научный сотрудник, доктор химических наук, заведующий лабораторией термодинамики и математического моделирования природных процессов

содержала только минеральную фазу. В наших расчётах мы рассматривали минеральную компоненту как сумму наиболее обильных соединений (SiO_2 , MgO , Fe , FeS). Для количественной оценки использовались значения солнечных распространённостей элементов по исследованию (Lodders, 2010). Содержание воды в небуле нам неизвестно, а имеющиеся оценки, полученные из данных по составу комет, крайне противоречивы. Однако очевидно, что оно зависело главным образом от содержаний основных кислородсодержащих компонентов газовой фазы небулы — CO и CO_2 , которые нам также неизвестны. Единственное, чем мы располагаем, это значениями относительных распространённостей всех элементов в небуле, в том числе водорода, кислорода и углерода. Это позволяет нам в рамках решения уравнения материального баланса оценить вероятные интервалы содержания как основных минеральных, так и газовых компонентов в околосолнечной небуле. В наших расчётах для учёта зависимости $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$ от содержания CO и CO_2 , мы варьировали значение молярного отношения CO/CO_2 от 0,1 до 10 моль/моль. Как можно видеть на рис. 1, в результате было получено, что значение $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$ не превышает 0,6 г/г, т.е., вода составляет не более 0,375 от общей массы тела. Полученные результаты согласуются с данными о составе Цереры, полученными миссией Dawn (с англ. — «Рассвет») (Zolotov, 2020).

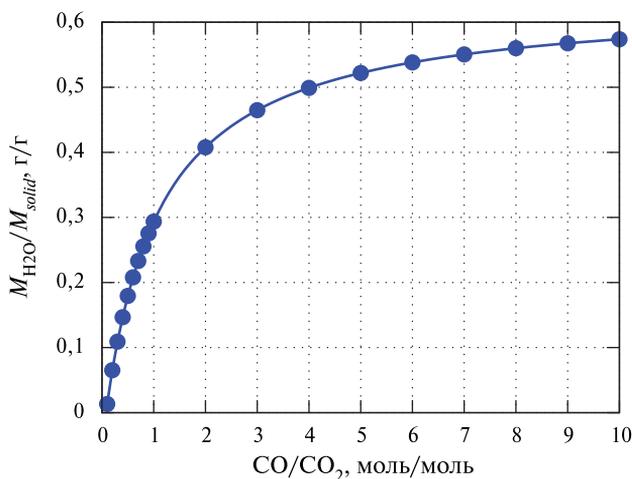


Рис. 1. Отношение массы льда воды к массе тугоплавкой компоненты во внутренней части небулы в зависимости от отношения CO/CO_2

Рассмотрим состав первичных планетезималей в зонах образования Юпитера и Сатурна. Поскольку температура в этом регионе не превышала 500 К, то тугоплавкие органические соединения, условно обозначаемые как CHON , поступившие в диск из протосолнечной небулы, не были разрушены. Согласно оценкам, полученным на основе состава кометной пыли (Дорофеева, 2020), в CHON могло содержаться от 30 до 50 % общего содержания углерода (ΣC), присутствующего в системе, поэтому мы варьировали долю содержания углерода в тугоплавких органических соединениях (C_{CHON}) от ΣC в этих пределах. Мы приняли формулу CHON как $\text{C}_{100}\text{H}_{70}\text{O}_{20}\text{N}_4$ согласно работе (Alexander et al., 2007). Основываясь на данных о составе регулярных спутников Юпитера (Кусков и др., 2009) с определённой долей уверенности можно полагать, что в период их образования ледяная компонента в регионе Юпитера состояла только

из H_2O , а температура в этом регионе были выше температуры конденсации иных газов, в том числе CO_2 и NH_3 . Согласно полученным результатам, которые представлены на рис. 2, для региона Юпитера максимальное отношение $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}} = 0,615 \text{ г/г}$, что достигается при $\text{CO}/\text{CO}_2 = 10$ моль/моль и $C_{\text{CHON}} = 0,5$, однако это значение понижается при уменьшении любого из параметров. Имеющиеся модели спутников Юпитера предполагают там различные массовые доли льда: 0,1 для Европы, 0,5 для Ганимеда и от 0,4 до 0,6 для Каллисто (Sohl et al., 2002), что не противоречит нашим оценкам.

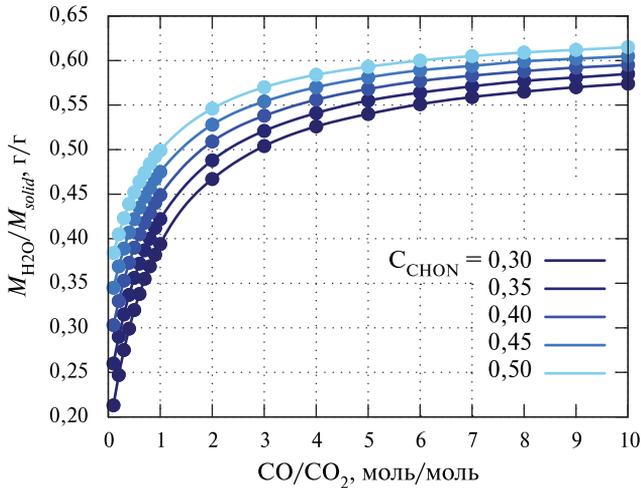


Рис. 2. Отношение массы льда воды к массе тугоплавкой компоненты в регионах формирования систем Юпитера в зависимости от отношения CO/CO_2 и доли C_{CHON}

Отметим, что отношение $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$, полученное для системы Юпитера, также справедливо и для льда воды в регионе Сатурна. Однако для региона Сатурна мы также учитывали, что ледяная компонента помимо H_2O включала в себя CO_2 и NH_3 , что мы можем заключить по изотопному составу азота в атмосфере Титана (Дорофеева, 2016). Другие же газы, в частности HCN и CH_3OH , присутствовали в гораздо меньших количествах (Müller, 2021), поэтому мы не учитывали их наличие в наших расчётах. Мы считали, что в аммиак входит 10 % от всего азота в небуле. Хотя температура конденсации NH_3 несколько ниже, чем достигалась в этом регионе солнечной небулы.

Полученные для региона Сатурна результаты представлены на рис. 3. Они показывают, что $M_{\text{ice}}/M_{\text{solid}}$ изменяется от 1,2 до 0,7 г/г и достигает наибольших значений при наименьших значениях CO/CO_2 и C_{CHON} . Дополнительным ограничением для значения $M_{\text{ice}}/M_{\text{solid}}$ могут служить оценки минимально необходимого содержания минеральной компоненты для обеспечения энергией радиоактивного распада, достаточной для дифференциации вещества спутников, полученные в работе (Дорофеева, Рускол, 2010).

Спутники Сатурна очень разнообразны по своему составу и строению, но, например, согласно исследованию (Perentice, 2007), на Япете массовая доля воды составляет 0,344, доля силикатов — 0,336, остальное составляет аммиак и клатратные гидраты с метаном. Эти расчёты хотя и не согласуются напрямую с нашими данными (так, в расчётах для Япета не учтён CO_2 и CHON , а также доля аммиака значительно выше), но не выходят за пределы нашей модели.

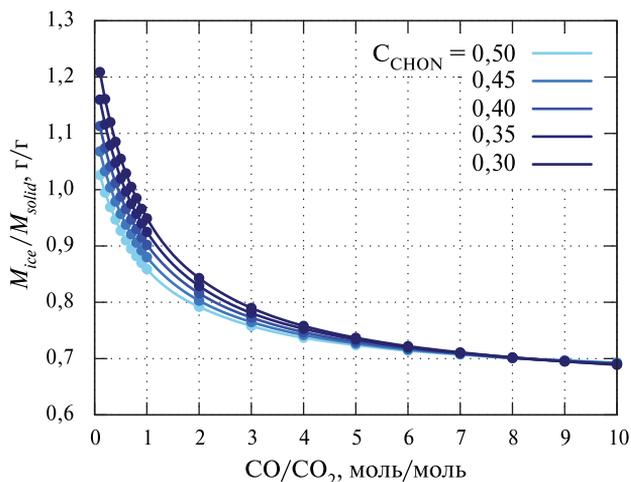


Рис. 3. Отношение массы льдов к массе тугоплавкой компоненты в регионе формирования системы Сатурна в зависимости от отношения CO/CO_2 и доли C_{CHON}

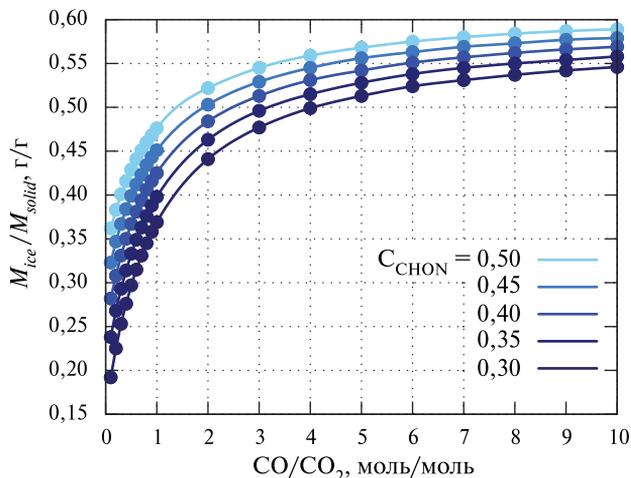


Рис. 4. Отношение массы льда воды к массе тугоплавкой компоненты в транснептуновом регионе в зависимости от отношения CO/CO_2 и доли C_{CHON}

В транснептуновом регионе в минеральной фазе присутствует не только Fe^0 небулярного происхождения, но и Fe^{+2}O досолнечного происхождения (Дорофеева, 2022). По мере отдаления от Солнца доля Fe^0 снижается, и увеличивается доля FeO . В качестве первого приближения мы приняли, что в транснептуновом регионе мольные количества Fe^0 и FeO равны и определяются как $0,5\Sigma(\text{Fe}-\text{FeS})$. Определение точного состава ледяной компоненты в транснептуновом регионе затруднено из-за неопределённости данных по кометам (Dello Russo et al., 2016). Поэтому в транснептуновом регионе мы рассматривали только отношение $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$. Согласно нашей оценке, $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$ не превышает 0,6 г/г. Здесь также следует учитывать фактор ограничения минимальной массы M_{solid} , которая необходима для обеспечения дифференциации тел, образовавшихся в транснептуновом регионе (Busarev et al., 2004). Полученная массовая доля воды не превышает $\sim 0,35$, что не противоречит данным о том, что доля

воды в кометных ядрах составляет $\sim 0,25$ (Fulle et al., 2017). Однако, чтобы принять точку зрения, что массовая доля воды может быть 0,17 (Rotundi et al., 2015), приходится предположить полное отсутствие CO_2 в солнечной небуле и долю C_{CHON} не выше 0,2, что противоречит известным данным о составах кометных ядер (Дорофеева, 2020).

ВЫВОДЫ

Были получены оценки сверху для ледяной компоненты в различных регионах ранней Солнечной системы.

1. Во внутреннем регионе лёд состоял только из воды, и отношение $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$ не превышало 0,57 г/г.
2. В регионе образования систем Юпитера и Сатурна в твёрдой фазе помимо минеральной компоненты присутствовала также тугоплавкая органика с условной формулой $\text{C}_{100}\text{H}_{70}\text{O}_{20}\text{N}$. Максимальное значение $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$ в этом регионе составляет 0,62 г/г.
3. В регионе системы Сатурна помимо льда воды присутствовал также лёд NH_3 и CO_2 . С вариацией CO/CO_2 и C_{CHON} , отношение $M_{\text{ice}}/M_{\text{solid}}$ может сильно меняться: от 1,2 до 0,7 г/г. Оно приближается к 1 и превышает её при низких значениях параметров.
4. Для транснептунового региона возможна оценка только отношения $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$, которое не превышает 0,59 г/г. Значение $M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{solid}}$ крайне мало зависит от отношения CO/CO_2 и сильно зависит от доли углерода в тугоплавкой компоненте.

ЛИТЕРАТУРА

- Дорофеева В. А. Генезис летучих регулярных спутников Сатурна. Происхождение атмосферы титана // Геохимия. 2016. № 1. С. 11–31. DOI: 10.31857/S0320930X22020037.
- Дорофеева В. А. Химический и изотопный состав кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (обзор результатов космической миссии Rosetta-Philae). Следствия для космогонии и космохимии // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 2. С. 110–134. DOI: 10.31857/S0320930X20020024.
- Дорофеева В. А. Роль радиального транспорта при формировании малых тел внешней солнечной системы // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 3. С. 183–197. DOI: 10.31857/S0320930X22020037.
- Дорофеева В. А., Рускол Е. Л. О тепловой истории спутников Сатурна: Титана и Энцелада // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 3. С. 212–221.
- Кусков О. Л., Дорофеева В. А., Кронрод В. А., Макалкин А. Б. Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 576 с.
- Макалкин А. Б. и Дорофеева В. А. Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца. I. Исходные данные, уравнения и методы построения моделей // Астрон. вестн. 1995. Т. 29. № 2. С. 99–122.
- Макалкин А. Б., Дорофеева В. А. Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца. II. Результаты расчета моделей // Астроном. вестн. 1996. Т. 30. № 6. С. 496–513.
- Alexander C. M. O'D., Fogel M., Yabuta H., Cody G. D. The origin and evolution of chondrites recorded in the elemental and isotopic compositions of their macromolecular organic matter // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. V. 71. P. 4380–4403. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.06.052>.

- Busarev V.V., Dorofeeva V.A., Makalkin A.B.* Absorption Bands at 4300 and 6000–8000 Å as Signs of Silicate and Organic Matter Separation and Formation of Hydrated Silicates in KBOs and Similar Bodies // *Bull. American Astronomical Soc.* 2004. V. 36. P. 1103.
- Dello Russo N., Kawakita H., Vervack R.J., Weaver H.A.* Emerging trends and a comet taxonomy based on the volatile chemistry measured in thirty comets with high-resolution infrared spectroscopy between 1997 and 2013 // *Icarus*, 2016. V. 278. P. 301–332. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.05.039.
- Dorofeeva V.A., Petaev M.I., Khodakovskiy I.L.* On the influence of nebula gas chemistry on condensate composition // *Lunar and Planetary Science Conference XIII Houston*, 1982. P. 181–182.
- Fulle M., Della Corte V. Rotundi A., Green S.F., Accolla M., Colangeli L., Ferrari M., Ivanovski S., Sordini R., Zakharov V.* The dust-to-ices ratio in comets and Kuiper belt objects // *Monthly Notes of the Royal Astronomical Soc.* 2017. V. 469. P. S45–S49. DOI: 10.1093/mnras/stx983.
- Lodders K.* Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophysical J.* 2003. V. 591. No. 2. P. 1220–1247.
- Lodders K.* *Solar System Abundances of the Elements* // *Astrophysics and Space Science Proc.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. P. 379–417.
- Müller B.* Spectroscopic measurements of CH₃OH in layered and mixed interstellar ice analogues // *Astronomy and Astrophysics*. 2021. V. 652. Art. No. A126. 10 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039139>.
- Perentice A.J.* Iapetus: a prediction for bulk chemical composition, internal physical structure and origin // *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 2007, abstract id.P13C-1432
- Rotundi A., Sierks H., Della Corte V. et al.* Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko inbound to the Sun // *Science*. 2015. V. 347. Iss. 6220. Art. id. aaa3905. DOI: 10.1126/science.aaa3905.
- Sohl F., Spohn T., Breuer D., Nagel K.* Implications from Galileo observations on the interior structure and chemistry of the Galilean satellites // *Icarus*. 2002. V. 157. P. 104–119. <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6828>.
- Zolotov M.Yu.* The composition and structure of Ceres' interior // *Icarus*. 2020. V. 335. Art. id. 113404. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113404>.

ESTIMATION OF THE COMPOSITION AND MASS OF THE ICE COMPONENT IN PRIMARY ICE-ROCK PLANETESIMALS OF THE NEAR-SOLAR DISK

E. A. Generalova, V. A. Dorofeeva

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS (GEOKHI), Moscow, Russia

The composition of ice and the refractory component in different regions of the solar nebula was estimated. The maximum estimates for the ice to refractory component mass ratios were obtained for various regions. The results are in good agreement with experimental measurements for various bodies of the Solar System such as Ceres and comets. The estimates obtained can also be used to model the internal structure and evolution of satellites and other small bodies of the Solar System.

Keywords: solar nebula, ice-rock bodies

Generalova Elizaveta Antonovna — junior researcher, postgraduate, lisa.generalova@yandex.ru
Dorofeeva Vera Alexeevna — chief researcher, doctor of chemical sciences, head of the Laboratory of thermodynamics and mathematical modelling of natural processes

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТИНУУМА И СТАБИЛЬНОСТЬ ЦИКЛОТРОННОЙ ЛИНИИ В РЕНТГЕНОВСКОМ ПУЛЬСАРЕ GRO J2058+42

А. С. Горбан^{1,4}, С. В. Мольков¹, С. С. Цыганков^{2,1}, А. А. Муштуков^{3,1}, А. А. Лутовинов^{1,4}

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

² Обсерватория Туорла, Университет Турку, Турку, Финляндия

³ Лейденская обсерватория, Лейденский университет, Лейден, Нидерланды

⁴ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия

Представлены результаты исследования транзиентного рентгеновского пульсара GRO J2058+42 в широком диапазоне энергий в состоянии со светимостью $L_x \approx 2,5 \cdot 10^{36}$ эрг·с⁻¹. В ходе работы было обнаружено, что профиль импульса источника, так же как и доля пульсирующего излучения, значительно изменились по сравнению с предыдущими наблюдениями обсерватории NuSTAR, когда пульсар был в ярком состоянии. Положение циклотронной линии на энергии ~10 кэВ в узкой фазовой области согласуется с наблюдениями в высоком состоянии. Был проведён спектральный анализ, который показал при высоких светимостях $L_x \approx (2,7 - 3,2) \cdot 10^{37}$ эрг·с⁻¹ типичную для аккрецирующих пульсаров форму спектра, в то время как при уменьшении светимости примерно на порядок, до $L_x \approx 2,5 \cdot 10^{36}$ эрг·с⁻¹, для описания спектра необходимо использование двухкомпонентной модели.

Ключевые слова: GRO J2058+42, рентгеновские источники, рентгеновские двойные, аккреция, магнитное поле

Рентгеновский пульсар GRO J2058+42 был обнаружен в сентябре 1995 г. во время яркой вспышки инструментом BATSE (*англ.* Burst and Transient Source Experiment) гамма-обсерватории Комптон (*англ.* Compton Gamma Ray Observatory). После обнаруженной вспышки пульсар продолжал проявлять активность примерно два года, при этом демонстрируя более слабые всплески излучения, связанные с прохождением нейтронной звездой периастра двойной системы. Это позволило определить орбитальный период системы в 55 дней (Wilson et al., 2005). Затем источник находился в спокойном состоянии до 22 марта 2019 г., когда была зарегистрирована новая гигантская вспышка с помощью инструмента BAT (*англ.* Burst Alert Telescope) обсерватории Нила Герелса Свифта (*англ.* Neil Gehrels Swift Observatory) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США и космического гамма-телескопа Ферми (*англ.* Fermi Gamma-ray Space Telescope). По данным обсерватории NuSTAR (*англ.* Nuclear Spectroscopic Telescope Array), полученным во время данной вспышки, была обнаружена линия циклотронного поглощения в спектре источника на энергии около 10 кэВ, которая была зарегистрирована только в узком фазовом интервале (Molkov et al., 2019). Данное открытие позволяет

Горбан Алёна Сергеевна — инженер, аспирант, gorbana@iki.rssi.ru

Мольков Сергей Владимирович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Цыганков Сергей Сергеевич — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Муштуков Александр Андреевич — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Лутовинов Александр Анатольевич — заместитель директора ИКИ РАН, доктор физико-математических наук

напрямую оценить напряжённость магнитного поля нейтронной звезды, входящей в систему.

Основной задачей настоящей работы было исследование свойств пульсара GRO J2058+42 при низких темпах аккреции по сравнению со свойствами во время вспышечной активности. Поэтому наблюдение было проведено примерно через 150 дней после максимума вспышки.

В работе представлены результаты временного и спектрального анализа источника GRO J2058+42, который находился в состоянии с низкой светимостью ($L_x = 2,5 \cdot 10^{36}$ эрг/с). Было показано, что при переходе к низкому темпу аккреции энергетический спектр источника сильно изменился. Поэтому для описания спектра была подобрана двухкомпонентная модель CompTT+CompTT. Также проведена фазово-разрешённая спектроскопия, которая показала наличие особенности около 10 кэВ в фазовом интервале импульса 0,05–0,15, что может быть интерпретировано как циклотронная линия поглощения. Циклотронная линия на энергии ~ 10 кэВ в узком фазовом интервале согласуется с наблюдениями в состоянии с высокой светимостью источника ($L_x = (2,7-3,2) \cdot 10^{37}$ эрг/с) (Molkov et al., 2019). Проведённый временной анализ показал изменения в профиле импульса по сравнению с состоянием с высокой светимостью; доля пульсирующего излучения указывает на особенность около 10 кэВ в низком и ярком состояниях (Горбан и др., 2022).

ЛИТЕРАТУРА

- Горбан А. С., Мольков С. В., Цыганков С. С., Муштуков А. А., Лутовинов А. А. Изменение природы спектрального континуума и стабильность циклотронной линии в рентгеновском пульсаре GRO J2058+42 // Письма в Астрон. журн. 2022. Т. 48. № 4. С. 279–289.
- Molkov S., Lutovinov A., Tsygankov S., Mereminskiy I., Mushtukov A. Discovery of a Pulse-phase-transient Cyclotron Line in the X-Ray pulsar GRO J2058+42 // The Astrophysical J. 2019. V. 883. No. 1. Art. No. L11. 6 p. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab3e4d>.
- Wilson C. A., Weisskopf M. C., Finger M. H., Coe M. J., Greiner J., Reig P., Papamastorakis G. Discovery of a Be/X-Ray Binary Consistent with the Position of GRO J2058+42 // The Astrophysical J. 2005. V. 622. No. 2. P. 1024–1032.

STUDY OF THE CHANGES IN THE NATURE OF THE SPECTRAL CONTINUUM AND THE STABILITY OF THE CYCLOTRON LINE IN THE X-RAY PULSAR GRO J2058+42

A. S. Gorban^{1,4}, S. V. Molkov¹, S. S. Tsygankov^{2,1}, A. A. Mushtukov^{3,1}, A. A. Lutovinov^{1,4}

¹ Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

² Tuorla Observatory, University of Turku, Turku, Finland

³ Leiden Observatory, Leiden University, Leiden, The Netherlands

⁴ Higher School of Economics, National Research University (HSE University), Moscow, Russia

This paper presents the results of a study of the transient X-ray pulsar GRO J2058+42 in a wide energy range in a state with a luminosity of $L_x \approx 2.5 \cdot 10^{36}$ erg·s⁻¹. It was found that the source pulse profile, as well as the pulsed fraction, changed significantly compared to previous NuSTAR observations when the pulsar was in its bright state. The position of the cyclotron line at an energy of 10 keV in a narrow phase region is consistent with observations in the bright state. A spectral

analysis was carried out, which showed a typical spectral shape of accreting pulsars at high luminosities $L_x \approx (2.7 - 3.2) \cdot 10^{37} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$. At an order of magnitude lower luminosity, up to $L_x \approx 2.5 \cdot 10^{36} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, a two-component model must be used to describe the spectrum.

Keywords: GRO J2058+42, X-ray sources, X-ray binaries, accretion, magnetic field

Gorban Alena Sergeevna — engineer, postgraduate, gorban@iki.rssi.ru

Molkov Sergey Vladimirovich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Tsygankov Sergey Sergeevich — researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Mushtukov Alexander Andreevich — researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Lutovinov Alexander Anatolyevich — deputy director of IKI, doctor of physics and mathematics sciences

ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ И ХЛОРА В ГРУНТЕ МАРСА ВДОЛЬ ТРАССЫ МАРСОХОДА «КЬЮРИОСИТИ» ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРА ДАН

М. В. Дьячкова, С. Ю. Никифоров, И. Г. Митрофанов, Д. И. Лисов, М. Л. Литвак, А. Б. Санин

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

В статье представлены актуальные результаты активных и пассивных измерений прибора ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити». Содержание воды и хлора в грунте Марса, полученное по результатам измерений, изучалось отдельно для геологических регионов вдоль трассы движения марсохода. Показано, что содержание воды, измеренное как водородный эквивалент воды, колеблется от практически нуля до максимума $6,1 \pm 0,7$ мас. %. Содержание эквивалентного хлора варьируется между практически нулём и $2,6 \pm 0,2$ мас. %. Такие вариации интерпретируются как связанные с различными геологическими процессами, происходящими на поверхности Марса под влиянием различных условий окружающей среды.

Ключевые слова: исследование Марса, марсоход, нейтронная спектроскопия, вода

ВВЕДЕНИЕ

Содержание воды в недрах современного Марса характеризует гидрологическую эволюцию планеты и процессы взаимодействия поверхности и атмосферы в современную эпоху. На Марсе есть области, представляющие особый интерес для подробных измерений химического состава недр, например, те, которые, как считается, образовались в эпоху «влажного Марса» и, следовательно, представляют большой интерес как потенциально обитаемые среды. В качестве области исследований марсохода «Кьюриосити» (*англ.* Curiosity — любопытство, любознательность) был выбран приэкваториальный кратер Гейл (*англ.* Gale crater). Исследования поверхности кратера показали, что нижние части центрального пика кратера образовалась в результате осадконакопления в озере, заполнявшем в период «влажного» Марса.

В состав научной аппаратуры марсохода «Кьюриосити» входит российский научный прибор динамическое альbedo нейтронов (ДАН) (Mitrofanov et al., 2012), который представляет собой активный и пассивный нейтронный спектрометр, позволяющий получать данные о содержании воды (водородного эквивалента воды, ВЭВ) и эквивалентного хлора в неглубоких (до 60 см) недрах вдоль маршрута марсохода. Эксперимент ДАН основан на физическом методе нейтронно-активационного анализа (Litvak et al., 2008; Mitrofanov et al., 2012). В активном режиме работы ДАН облучает исследуемые недра импульсами нейтронов высокой энергии. Содержание ВЭВ и эквивалентного хлора

Дьячкова Майя Викторовна — младший научный сотрудник, djachkova@np.cosmos.ru

Никифоров Сергей Юрьевич — научный сотрудник

Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом,
доктор физико-математических наук

Лисов Денис Игоревич — младший научный сотрудник

Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией,
доктор физико-математических наук

Санин Антон Борисович — старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

определяют анализом временных профилей постимпульсной эмиссии тепловых и надтепловых нейтронов. ДАН также может использоваться в пассивном режиме (Mitrofanov et al., 2012), когда регистрируемые нейтроны образуются либо в марсианской атмосфере, либо в недрах под воздействием высокоэнергетических частиц галактических космических лучей или излучаются многоцелевым радиоизотопом марсохода.

ПРИБОР ДАН: АКТИВНЫЕ И ПАССИВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Прибор ДАН состоит из двух отдельных блоков: ДАН ДЭ — блок детектора и электроники, ДАН ИНГ — генератор импульсных нейтронов (Mitrofanov et al., 2012). ДАН ДЭ содержит два пропорциональных счётчика, заполненных газом ^3He , для регистрации тепловых и надтепловых нейтронов с энергией до 100 эВ (детектор СТН) и надтепловых нейтронов от 0,4 до 100 эВ (детектор СЕТН). При работе ДАН ДЭ в пассивном режиме его детекторы регистрируют локальный нейтронный фон. Он состоит из двух компонент, которые генерируются в марсианских недрах из-за бомбардировки галактическими космическими лучами и производятся радиоизотопным источником марсохода (некоторые частицы второго компонента распространяются непосредственно на счётчики, другие рассеиваются обратно в неглубоких недрах перед обнаружением). В активном режиме установка ДАН ИНГ генерирует короткие импульсы нейтронов с энергией 14 МэВ, а ДАН ДЭ регистрирует дополнительные отсчёты постимпульсной эмиссии замедленных нейтронов после их взаимодействия с ядрами неглубоких недр.

Анализ временных профилей постимпульсной эмиссии тепловых и надтепловых нейтронов позволяет определить содержание как ВЭВ, так и эквивалентного хлора для подповерхностного вещества (Lisov et al., 2018; Mitrofanov et al., 2014). Их значения могут быть получены из активных данных ДАН сравнением зарегистрированных послеимпульсных временных профилей на счётчиках СТН и СЕТН и численно предсказанных постимпульсных временных профилей аналогичных счётчиков в соответствии с проверочными моделями строения и состава недр.

За период наблюдений ДАН с 9 августа 2012 г. по 21 декабря 2021 г. общий пройденный путь «Кьюриосити» составил около 27 км. На этом пути проведено 1002 активных измерения. Правила управления марсоходом разрешают активные измерения ДАН только на остановках, поэтому каждое активное измерение ДАН соответствует отдельной точке на поверхности вдоль траверса. Пространственное разрешение активного нейтронного зондирования составляет около 3 м (Sanin et al., 2015). Точки с активными измерениями могут быть удалены друг от друга на несколько десятков метров, такими данными покрыто лишь около 11 % длины маршрута «Кьюриосити». Таким образом, по активным данным ДАН можно построить выборочное распределение ВЭВ, а также эквивалентного хлора для поверхности кратера Гейл.

Такое распределение активных измерений на поверхности затрудняет корреляцию измерений с наблюдаемыми изменениями в литологии или составе поверхности вдоль маршрута. Действительно, активные измерения для специальных исследовательских кампаний на некоторых конкретных участках показали, что локальные изменения ВЭВ и эквивалентного хлора в недрах происходят в масштабах порядка метров (Litvak et al., 2014, 2016). Следовательно, возможность непрерывных измерений вдоль маршрута марсохода представляет значительный интерес. Такие данные можно получить от ДАН в пассивном режиме работы, когда ИНГ не излучает, а ДАН ДЭ почти непрерывно работает парал-

тельно с другими научными приборами на борту марсохода. Временные профили отсчётов локального нейтронного фона на детекторах CTN и CETN регистрируются с разрешением 20 с (Никифоров и др., 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Траектория движения марсохода «Кьюриосити» пересекает геологические регионы, которые были идентифицированы научной командой марсохода на основе данных, полученных как «Кьюриосити», так и орбитальных. Основным способом организации наблюдаемой геологии (в первую очередь литологии) научной команды марсохода было создание стратиграфической колонки (Rampe et al., 2020). Стратиграфическая колонка, в которой регистрируются различные литологии поверхности по высоте, разделена на неформальные группы, формации и элементы. Каждое измерение ДАН было привязано к определённому элементу стратиграфической колонки. Ассоциация измерений ДАН с элементами стратиграфической колонки предназначена для поиска корреляции с наблюдаемыми характеристиками поверхности.

На рис. 1 представлено распределение ВЭВ для активных и пассивных измерений. Распределения хорошо согласуются между собой.

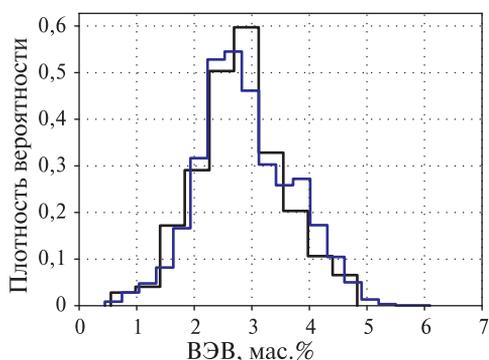


Рис. 1. Распределение ВЭВ, полученное из активных (чёрный цвет) и пассивных (синий) измерений ДАН. Оба распределения нормированы на единицу

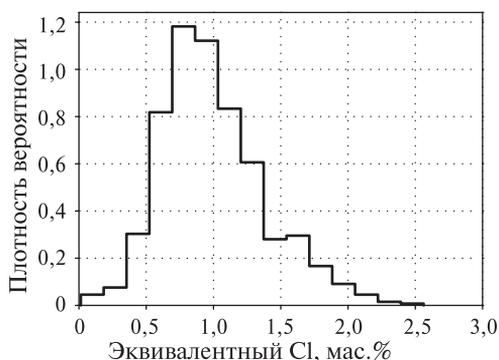


Рис. 2. Распределение эквивалентного хлора, полученное из активных измерений ДАН. Распределение нормировано на единицу

Максимальное значение ВЭВ, равное $6,1 \pm 0,7$ мас.% наблюдается в пассивных данных, элементе Sutton Island формации Мюррей. Это намного больше, чем максимальное значение ВЭВ по активным данным, $4,83 \pm 0,27$ мас.%, которое наблюдается в элементе Knockfarrill Hill, члене формации Carolyn Shoemaker.

Содержание эквивалентного хлора, как видно на рис. 2, колеблется от почти нулевого до максимального значения $2,56 \pm 0,21$ мас.%, наблюдаемого в группе Брэдбери.

Из рис. 3 и 4 видно, что данные измерений ДАН варьируют в зависимости от локальных геологических характеристик поверхности. Что именно выступает основным фактором, влияющим на значения измерений: особенности литологии поверхности или её минеральный состав — предмет изучения следующих исследований.

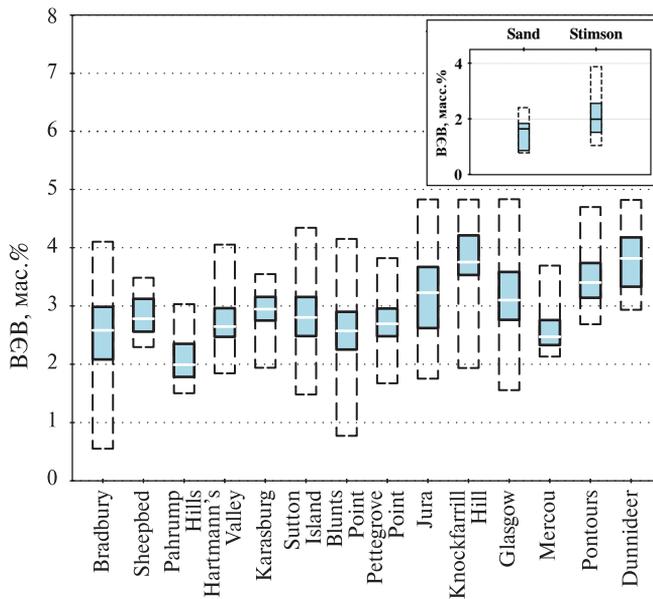


Рис. 3. Распределение ВЭВ по данным активных измерений ДАН в геологических элементах поверхности, соответствующих стратиграфической колонке. Боксы, заполненные голубым цветом, соответствуют данным от первого до третьего квантиля, толстая линия внутри них — медиана. Незаполненные боксы соответствуют всему диапазону данных от минимального до максимального значений

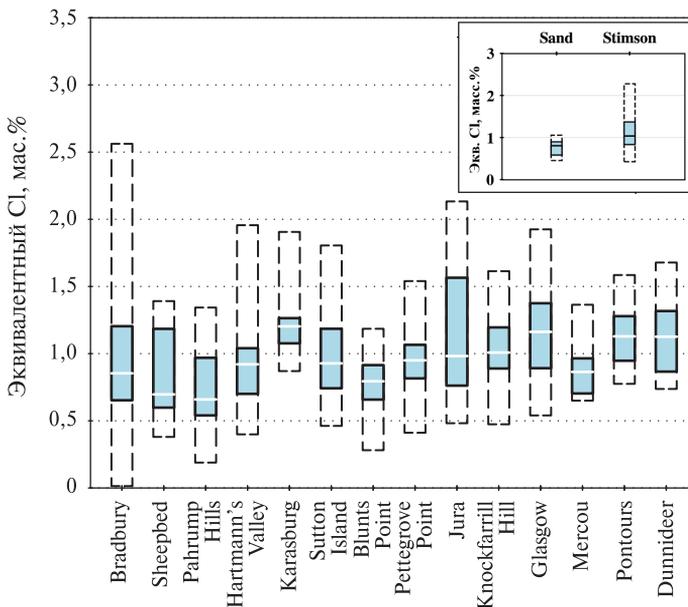


Рис. 4. Распределение эквивалентного хлора по данным активных измерений ДАН в геологических элементах поверхности, соответствующих стратиграфической колонке. Боксы, заполненные голубым цветом, соответствуют данным от первого до третьего квантиля, толстая линия внутри них — медиана. Незаполненные боксы соответствуют всему диапазону данных от минимального до максимального значений

ЛИТЕРАТУРА

- Никифоров С. Ю., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Дьячкова М. В., Лисов Д. И., Санин А. Б. Оценка содержания воды в марсианском грунте вдоль трассы движение марсохода «Кьюриосити» по данным пассивных измерений прибора ДАН // 18-я Конф. молодых учёных «Фундамент. и приклад. космич. исслед.». ИКИ РАН, Москва, 14–16 окт. 2020: сб. тр. / под ред. А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 72–78. DOI: 10.21046/KMU-2021-72-78.
- Lisov D. I., Litvak M. L., Kozyrev A. S., Mitrofanov I. G., Sanin A. B. Data processing results for the active neutron measurements by the DAN instrument on the curiosity Mars rover // *Astronomy Letters*. 2018. V. 44(7). P. 482–489. DOI: 10.1134/S1063773718070034.
- Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Barnakov Y. N., Mitrofanov I. G., Sanin A. B. The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8(3). P. 605–612. DOI: doi.org/10.1089/ast.2007.0157.
- Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Lisov D., Behar A., Boynton W. V., Deflores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M., Nikiforov S., Shvetsov V. N., Stack K., Starr R., Tate C., Tretyakov V. I., Vostrukhin A., the MSL Team Local variations of bulk hydrogen and chlorine-equivalent neutron absorption content measured at the contact between the Sheepbed and Gillespie Lake units in Yellowknife Bay, Gale Crater, using the DAN instrument onboard curiosity // *J. Geophysical Research: Planets*. 2014. V. 119(6). P. 1259–1275. <https://doi.org/10.1002/2013JE004556>.
- Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Hardgrove C., Stack K. M., Sanin A. B., Lisov D., Boynton W. V., Fedosov F., Golovin D., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M., Nikiforov S., Vostrukhin A. Hydrogen and chlorine abundances in the Kimberley formation of Gale crater measured by the DAN instrument on board the Mars Science Laboratory Curiosity rover // *J. Geophysical Research: Planets*. 2016. V. 121(5). P. 836–845. <https://doi.org/10.1002/2015JE004960>.
- Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Varenikov A. B., Barnakov Y. N., Behar A., Bobrovitsky Y. I., Bogolubov E. P., Boynton W. V., Harshman K., Kan E., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Ponomareva S. N., Ryzhkov V. I., Sanin A. B., Smirnov G. A., Shvetsov V. N., Timoshenko G. N., Tomilina T. M., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. A. Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Science Reviews*. 2012. V. 170(1–4). P. 559–582. DOI: 10.1007/s11214-012-9924-y.
- Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B., Starr R. D., Lisov D. I., Kuzmin R. O., Behar A., Boynton W. V., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Milliken R. E., Mischna M. A., Moersch J. E., Tate C. G. Water and chlorine content in the Martian soil along the first 1900 m of the curiosity rover traverse as estimated by the DAN instrument // *J. Geophysical Research: Planets*. 2014. V. 119(7). P. 1579–1596. <https://doi.org/10.1002/2013JE004553>.
- Rampe E. B., Blake D. F., Bristow T. F., Bristow T. F., Ming D. W., Vaniman D. T., Morris R. V., Achilles C. N., Chipera S. J., Morrison S. M., Tu V. M., Yen A. S., Castle N., Downs G. W., Downs R. T., Grotzinger J. P., Hazen R. M., Treiman A. H., Peretyazhko T. S., Des Marais D. J., Walroth R. C., Ircraig P., Crisp J. A., Lafuente B., Morookian J. M., Sarrazin P. C., Thorpe M. T., Bridges J. C., Edgar L. A., Fedo C. M., Freissinet C., Gellert R., Mahaffy P. R., Newsom H. E., Johnson J. R., Kah L. C., Siebach K. L., Schieber J., Sun V. Z., Vasavada A. R., Wellington D., Wiens R. C. the MSL Science Team Mineralogy and geochemistry of sedimentary rocks and eolian sediments in Gale crater, Mars: A review after six Earth years of exploration with Curiosity // *Geochemistry*. 2020. V. 80. No. 2. Art. No. 125605. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125605>.
- Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Lisov D. I., Starr R., Boynton W., Behar A., DeFlores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmina R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M. I., Nikiforov S., Shvetsov V. N., Tate C., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. Data processing of the active neutron

experiment DAN for a Martian regolith investigation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2015. V. 789. P. 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.03.085>.

VARIATIONS OF WATER AND CHLORINE CONTENT MEASURED BY DAN INSTRUMENT IN THE MARTIAN SUBSURFACE ALONG THE CURIOSITY ROVER TRAVERSE

M. V. Djachkova, S. Yu. Nikiforov, I. G. Mitrofanov, D. I. Lisov, M. L. Litvak, A. B. Sanin

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

This paper presents the results of active and passive DAN measurements onboard the NASA's Curiosity rover. The content of water and chlorine in the subsurface of Mars, obtained from the results of measurements, were investigated separately for different regions traversed by the rover. It is shown that the water content, measured as a water equivalent hydrogen, ranges from almost zero to a maximum of 6.1 ± 0.7 wt.%. The content of equivalent chlorine ranges from almost zero to 2.6 ± 0.2 wt.%. Such variations are interpreted as associated with processes developing on the Martian surface under the influence of various natural environmental conditions.

Keywords: Mars exploration, rover, neutron spectroscopy, water

Djachkova Maya Viktorovna — junior researcher, djachkova@np.cosmos.ru

Nikiforov Sergey Yurievich — researcher

Mitrofanov Igor Georgievich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences

Lisov Denis Igorevich — junior researcher

Litvak Maxim Leonidovich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences

Sanin Anton Borisovich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

ДВУЖИДКОСТНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ СЛАБО ИОНИЗИРОВАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ. ЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ

Ю. Т. Клименко^{1,2}, С. И. Сафонов², М. А. Федотова², А. С. Петросян^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия

² Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

Слабо ионизированной плазмой является плазма, степень ионизации которой много меньше единицы. В плазменной астрофизике приближение слабо ионизированной плазмы используется для описания процессов межзвёздной среды, солнечной хромосферы, магнитосфер планет. В слабо ионизированной плазме важную роль играет взаимодействие ионизированной компоненты с нейтральной. Предметом исследования выступают крупномасштабные процессы в слабо ионизированной вращающейся трёхмерной плазме при наличии таких взаимодействий. Для описания явлений, происходящих в слабо ионизированной плазме, используются уравнения многожидкостной магнитной гидродинамики. Предложена система уравнений магнитной гидродинамики для двухжидкостной модели слабо ионизированной вращающейся плазмы с учётом собственного электромагнитного поля. Развита линейная теория волновых процессов в рамках предложенных уравнений.

Ключевые слова: слабо ионизированная плазма, хромосфера, линейные волны, магнитная гидродинамика

Для описания явлений, происходящих в слабо ионизированной плазме, используются уравнения движения многожидкостной магнитной гидродинамики (Гершман, 1974) во вращающейся системе отсчёта в магнитном и электрическом поле для нейтральной, ионной и электронной компоненты плазмы с учётом столкновений:

$$\rho_n \frac{d\mathbf{u}_n}{dt} = -\nabla p_n + 2\rho_n[\mathbf{u}_n, \Omega] + \alpha_{en}(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_e) - \alpha_{in}(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_i), \quad (1)$$

$$\rho_i \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = -\nabla p_i + 2\rho_i[\mathbf{u}_i, \Omega] + eN_i \left[\mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{u}_i, \mathbf{B}] \right] - \alpha_{in}(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_n) - \alpha_{ie}(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_e), \quad (2)$$

$$\rho_e \frac{d\mathbf{u}_e}{dt} = -\nabla p_e + 2\rho_e[\mathbf{u}_e, \Omega] - eN_e \left[\mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{u}_e, \mathbf{B}] \right] - \alpha_{en}(\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_n) - \alpha_{ie}(\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_i), \quad (3)$$

Для перехода к двухжидкостному описанию введём плотность тока $\mathbf{j} = en_e(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_e)$ и суммируем выражения (2) и (3). В результате, пренебрегая инерцией электронов, получаем уравнение движения ионно-электронной жидкости:

$$\rho_i \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = -\nabla p_{i,e} + 2(\rho_i + \rho_e)[\mathbf{u}_i, \Omega] - 2\frac{m_e}{e}[\mathbf{j}, \Omega] + \frac{1}{c}[\mathbf{j}, \mathbf{B}] + \frac{\alpha_{en}}{en_e} \mathbf{j} + (\alpha_{in} + \alpha_{en}) \cdot (\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_i). \quad (4)$$

Далее выведем закон электромагнитной индукции, опираясь на уравнение движения электронной компоненты и уравнения Максвелла, и дополним исследу-

Клименко Юлия Тимофеевна — студентка магистратуры, klimenko.yut@phystech.edu

Сафонов Сергей Игоревич — инженер

Федотова Мария Андреевна — аспирант

Петросян Аракел Саркисович — профессор, доктор физико-математических наук

дугие уравнения условиями несжимаемости до системы 11 уравнений и 11 неизвестных. Учтём также, что $\alpha_{en} \ll \alpha_{in}$, а $\rho_e \ll \rho_i$, тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_n \frac{d\mathbf{u}_n}{dt} = -\nabla p_n + 2\rho_n[\mathbf{u}_n, \Omega] - \frac{\alpha_{en}c}{4\pi en_e}[\nabla, \mathbf{B}] - \alpha_{in}(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_i), \\ \rho_i \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = -\nabla p_{i,e} + 2\rho_i[\mathbf{u}_i, \Omega] - 2\frac{m_e c}{4\pi e}[\nabla, \mathbf{B}], \Omega + \frac{1}{4\pi}[[\nabla, \mathbf{B}], \mathbf{B}] + \\ \quad + \frac{\alpha_{en}c}{4\pi en_e}[\nabla, \mathbf{B}] + \alpha_{in}(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_i), \\ 0 = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - (\mathbf{B}, \nabla)\mathbf{u}_i - (\mathbf{u}_i, \nabla)\mathbf{B} - \frac{\alpha_{en}c}{en_e}[\nabla, (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_n)] + \frac{m_e c}{e}f\nabla_z \mathbf{u}_i - \frac{m_e c^2}{4\pi e^2 n_e}[\nabla, f\nabla_z \mathbf{B}], \\ \text{div} \mathbf{u}_n = 0, \\ \text{div} \mathbf{u}_i = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

В полученных уравнениях сила Кориолиса записана в приближении f -плоскости, в рамках которой вектор Кориолиса $\mathbf{f} = 2\Omega = (0, 0, f_V)$, где $f_V = f \sin \varphi = \text{const}$ (φ — широта исследуемой области).

Наша цель заключается в получении дисперсионных соотношений для волн в линейном приближении. Для этого представим неизвестные в виде стационарного решения системы и малой осциллирующей добавки:

$$\mathbf{u}_i = 0 + \delta\mathbf{u}_i, \quad \mathbf{u}_n = 0 + \delta\mathbf{u}_n, \quad \mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \delta\mathbf{b}, \quad p_{ie} = p_{ie}^0 + \delta p_{ie}, \quad p_n = p_n^0 + \delta p_n.$$

Далее представим осциллирующие добавки в виде плоских волн с частотой ω и волновым вектором \mathbf{k} и подставим в систему уравнений (5), пренебрегая нелинейными членами. Равенство нулю детерминанта результирующей матрицы системы при проецировании на оси координат даст дисперсионное уравнение 5-й степени для линейных волн в слабо ионизированной вращающейся плазме в двухжидкостном описании.

В высокочастотном пределе при рассмотрении только двух слагаемых старших степеней при ω пропадает зависимость как от магнитного поля, так и от силы Кориолиса. Поэтому рассмотрим дисперсионное уравнение, отбросив все слагаемые, кроме членов с ω^5 , ω^4 , ω^3 . Тогда в высокочастотном пределе дисперсионное соотношение представляет собой уравнение второй степени и имеет два корня:

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{8(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B})\alpha_{in}^* k^2 \rho_i \rho_n \pi^2} \times \left[\alpha_{en}^{*4} k^6 \rho_i^3 - 16\alpha_{en}^{*2} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}) \alpha_{in}^2 k^4 \rho_n^2 \pi + \right. \\ \left. + 8\alpha_{en}^* (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}) \alpha_{in} f k^2 k_z \rho_i \rho_n^2 B_f (4\pi + k^2 Q) + \right. \\ \left. + 4(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}) \alpha_{in}^2 \rho_n^2 \left(4\pi \left(4f^2 k_z^2 \rho_i \pi + k^2 B_f^2 \right) + f^2 k^4 k_z^2 \rho_i Q^2 \right) \right]^{1/2}.$$

Здесь и далее использованы обозначения $\alpha_{en}^* = \alpha_{en} \frac{c}{en_e}$, $q = \frac{mc}{e}$, $B_f = (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}) - f k_z q$.

Дисперсионные кривые в этом случае симметричны относительно оси ординат (рис. 1), однако их вид меняется в зависимости от величины проекции волнового вектора на оси Ox и Oy . Так, при $k_{\perp} \ll k_z$ минимум дисперсионной

кривой поднимается выше нуля на некоторое значение. По мере увеличения k_{\perp} минимум дисперсионной кривой опускается в нуль.

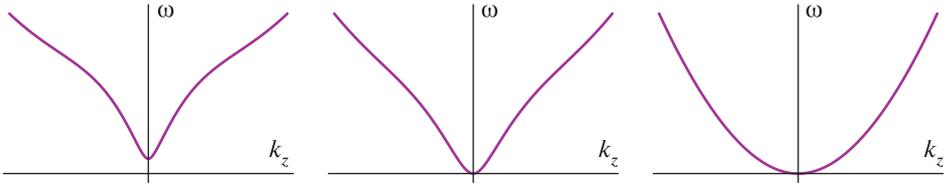


Рис. 1. Дисперсионные кривые $\omega(k_z)$ в пределе высоких частот

В низкочастотном пределе получаем линейное дисперсионное уравнение, которое задаёт дисперсионное соотношение следующего вида:

$$\omega = \alpha_{en}^* k^2 \left(\alpha_{en}^* f k_z \rho_i + \alpha_{in} B_f \right) \times$$

$$\times \frac{\alpha_{en}^{*2} f k_z k^2 \rho_n - (\alpha_{en}^* \alpha_{in} k^2 + B_f f k_z \rho_n) B_f + f^3 Q \rho_i \rho_n k_z^3}{\left[\alpha_{en}^{*2} \alpha_{in} k^2 \rho_n \left(k^2 B_f^2 - 4 \pi f^2 k_z^2 \rho_n \right) + \alpha_{en}^* f k_z \left(2 f^2 k_z^2 \rho_i \rho_n^2 + \alpha_{in}^2 k^2 \rho_n \right) B_f (4 \pi + k^2 Q) + \right.}$$

$$\left. + \alpha_{in} \rho_n \left(k^2 \left(B_f^2 - f^2 k_z^2 Q \rho_i \right)^2 + 4 \rho_n \pi f^2 k_z^2 B_f^2 + f^4 k_z^4 k^2 Q^2 \rho_i \rho_n \right) \right]}$$

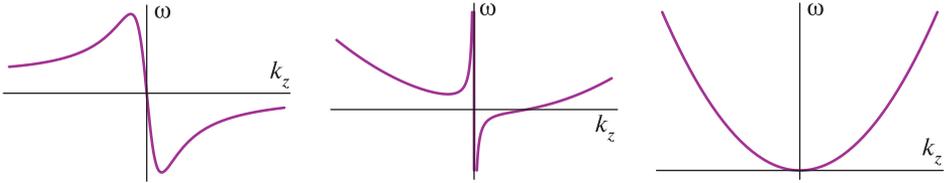


Рис. 2. Дисперсионные кривые $\omega(k_z)$ в пределе низких частот

При фиксированных k_{\perp} дисперсионные кривые $\omega(k_z)$ принимают три принципиально различных вида (см. рис. 2). В том случае, когда проекции волнового вектора на оси Ox и Oy равны нулю, т. е. в случае вертикальных течений, частота зависит квадратично от модуля волнового вектора. Когда $k_{\perp} \ll k_z$, дисперсионная кривая имеет две ветви, когда $k_{\perp} \approx k_z$, дисперсионная кривая вновь непрерывна и имеет характерный максимум и минимум.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис».

ЛИТЕРАТУРА

Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.

TWO-FLUID APPROXIMATION FOR WEAKLY IONIZED ROTATING COSMIC PLASMA. LINEAR WAVES

Y. T. Klimenko^{1,2}, S. I. Safonov², M. A. Fedotova², A. S. Petrosyan^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

² Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

Weakly ionized plasma is a plasma whose degree of ionization is much less than unity. Weakly ionized plasma in space physics takes place in the interstellar medium, solar chromosphere and planetary magnetospheres. In weakly ionized plasma, the interactions of the ionized component with the neutral one play an important role. In this research, the subject of study is large-scale processes in weakly ionized plasma in the presence of such interactions. To describe processes occurring in weakly ionized plasma, the equations of multifluid magnetohydrodynamics are used. In the present study, a system of equations of magnetohydrodynamics is proposed for a two-fluid model of weakly ionized rotating plasma, taking into account its own electromagnetic field. A linear theory of wave processes has been developed within the framework of the proposed equations.

Keywords: weakly ionized plasma, chromosphere, linear waves, magnetohydrodynamics, rotation

Klimenko Yulia Timofeevna — graduate student, klimenko.yut@phystech.edu

Safonov Sergey Igorevich — engineer

Fedotova Maria Andreevna — postgraduate

Petrosyan Arakel Sarkisovich — professor, doctor of physical and mathematical sciences

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСТ-ОБРАБОТКИ КРИВЫХ БЛЕСКА ZTF ДЛЯ ДВОЙНОЙ ЧЁРНОЙ ДЫРЫ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ МАССЫ J163159.59+243740.3

Д. А. Матвеев^{1,2}, *М. В. Демьяненко*^{2,3,5}, *И. В. Чилингарян*^{2,4}, *К. А. Гришин*^{2,7},
И. Ю. Катков^{2,6}, *В. С. Гораджанов*^{1,2}, *В. А. Топтун*^{1,2}, *И. А. Кузьмин*^{1,2}

- ¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), физический факультет, Москва, Россия
- ² Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ) Москва, Россия
- ³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия
- ⁴ Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр, Кембридж, США
- ⁵ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия
- ⁶ Нью-Йоркский университет Абу-Даби, Абу-Даби, ОАЭ
- ⁷ Парижский университет, Лаборатория элементарных частиц и космологии Париж, Франция

Представлен анализ методов обработки кривых блеска, получаемых с помощью сервиса разностной фотометрии Zwicky Transient Facility (ZTF) Forced Photometry service. Данные ZTF имеют несовершенную фотометрию. По этой причине рассматриваются методы, направленные на устранение несуществующих трендов в кривых блеска и подавление других эффектов, мешающих отождествить реальную переменность в двух фотометрических полосах (ZTF-g, ZTF-r). В число важных шагов обработки двумерных временных рядов входят: фильтрация точек отбрасыванием некорректных наблюдений по критериям из инструкций фотометрии ZTF, коррекция цвета и коррекция фотометрического нуля-пункта, коррекция путём вычитания медианной звезды сравнения, полученной из 50 ближайших к источнику звёзд на снимке.

Ключевые слова: активные ядра галактик, чёрные дыры промежуточных масс

ВВЕДЕНИЕ

Обзоры неба, проводящиеся в течение нескольких лет, предоставляют возможность обнаружения переменности слабых объектов в оптическом диапазоне спектра, что используется для поиска и подтверждения кандидатов в активные ядра галактик (*англ.* active galactic nuclei — AGN) I-го типа, питаемых чёрными дырами промежуточных масс (*англ.* IntermediateMass Black Hole — IMBH). Настоящая работа предоставляет возможность сравнить вклад различных методов пост-обработки в фотометрическую коррекцию, что в свою очередь позволяет понять, какой вклад в изменение статистики хи-квадрат временного ряда вносит каждый этап пост-процессинга на примере объекта J163159.59+243740.3.

Матвеев Дмитрий Александрович — студент, matveev.da21@physics.msu.ru

Демьяненко Мария Владимировна — студентка магистратуры

Чилингарян Игорь Владимирович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук

Гришин Кирилл Алексеевич — аспирант, младший научный сотрудник

Катков Иван Юрьевич — старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук

Гораджанов Владимир Сергеевич — студент

Топтун Виктория Алексеевна — студент

Кузьмин Иван Алексеевич — студент

Преимущество данного метода заключается в доступности данных для большого числа объектов-кандидатов, в отличие от альтернативного подхода к подтверждению активности ядер путём проведения дорогостоящих рентгеновских наблюдений на космических обсерваториях.

ПАРАМЕТРЫ ПОЛУЧАЕМЫХ ДАННЫХ

Сервис разностной фотометрии Zwicky Transient Facility (ZTF) Forced Photometry service предоставляет дополнительную информацию, которая необходима для лучшей обработки наблюдений. В это число входят данные о фотометрических полосах, данные о квадрантах ПЗС-матрицы, в которых наблюдался нужный объект, данные о качестве полученного сигнала и др.

Для построения кривых блеска используются две фотометрические полосы — ZTF-g и ZTF-g; реализованный подход пост-обработки временного ряда и подсчёта статистики применяется к ним по отдельности.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПЕРЕМЕННОСТИ

В настоящей работе для оценки переменности используются два параметра: для каждой из фотометрических полос рассчитываются значение статистики хи-квадрат и значение p -value.

Считается, что при определении этих параметров нулевой гипотезой объект не имеет переменности (константа с белым шумом), а альтернативной гипотезой — наличие переменности. Критическим значением для p -value выбрано значение $\alpha = 10^{-6}$. Другими словами, если итоговое значение p -value оказывается меньше α , то объект в рамках данной работы можно оценивать как объект, имеющий переменность.

МЕТОДЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Фотометрическую обработку данных можно разбить на две основные составляющие. Первая — это фотометрическая коррекция в соответствии с инструкциями ZTF по имеющейся сопроводительной информации к каждому из наблюдений, а также коррекция сдвига нуль-пунктов между наблюдениями с различных квадрантов ПЗС матрицы. Вторая — коррекция по медианной звезде сравнения.

В фотометрическую коррекцию по инструкциям ZTF входит цветокоррекция, фильтрация нефотометрических данных (Masci et al., 2019).

Коррекция сдвига нуль-пунктов — важная часть фотометрической коррекции ввиду строения ПЗС-матрицы: она разделена на 64 квадранта, имеющих различное пороговое значение чувствительности. Отчасти по этой же причине имеются некачественные данные в некоторых областях небесной сферы по причине попадания объектов на края между квадрантами ПЗС-матрицы.

Для коррекции по медианной звезде по каталогу Gaia определяются 50 ярких ближайших к объекту звёзд, которые отмечены как не переменные, и из базы данных ZTF Forced Photometry Service запрашиваются данные по ним. Для каждой из выбранных звёзд происходит фильтрация некачественных наблюдений. Ввиду этого, для построения медианной звезды применяются 30–50 звёзд. Затем происходит корректировка кривой блеска кандидата в AGN I-го типа путём вычитания медианной звезды сравнения (Demianenko et al., 2022). Этот метод позволяет корректировать измерения потока кандидата в AGN I-го типа

по медианной опорной звезде, также удаляя потенциальные переменные звёзды, которые не отмечены в Gaia путём итеративного сравнения значения наблюдения у звезды и медианной звезды с кадра. Наконец, мы получаем полностью скорректированную кривую блеска кандидата в AGN I-го типа, которую затем можем проанализировать статистически.

РАССМОТРЕНИЕ ЗНАЧИМОСТИ КАЖДОГО МЕТОДА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Для примера будет рассмотрен объект J163159.59+243740.3 — уникальный кандидат в AGN I-го типа с двойной чёрной дырой промежуточной массы, который был выделен при расширении выборки из публикации (Chilingarian et al., 2018) (рис. 1). Для данного объекта прослеживается как кратковременная переменность, вызванная эффектами в аккреционном диске, так и длительная за счёт двойственности системы чёрных дыр. Весной 2022 г. на этот объект было получено наблюдательное время на космическом телескопе «Хаббл» (англ. Hubble Space Telescope, HST). Если наблюдения подтвердят наличие двойной системы, это будет первый пример, непосредственно доказывающий иерархический рост сверхмассивных чёрных дыр в режиме малой массы.

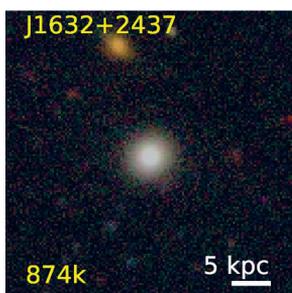


Рис. 1. Изображение J1632+24, полученное из каталога DR9 DESI Legacy Imaging Surveys. В левом нижнем краю изображения указана масса галактики в массах Солнца, в правом нижнем углу — линейные размеры объекта в плоскости изображения

Для этого объекта на каждом этапе коррекции значение p -value меньше критического α , поэтому будет рассматриваться только значение статистики хи-квадрат. Ниже (рис. 2–7) представлены результаты построения кривых блеска, применяя к ним различные методы обработки.

Как мы видим, коррекция цвета и коррекция фотометрического нуля-пункта изменяет положение точек по звёздной величине, а коррекция не фотометрических данных, убирает некоторые из точек с некачественными данными.

В свою очередь коррекция по медианной звезде изменяет общий вид кривой блеска и вносит значительный вклад в статистику распределения хи-квадрат. На рис. 8 представлен график значений статистики распределения хи-квадрат для каждой из построенных выше кривых блеска. Из этого следует, что вклад, вносимый в удаление несуществующих трендов кривой блеска, наиболее значимый для метода корректировки по медианной звезде.

На рис. 9 представлен график значения статистики хи-квадрат при игнорировании определённых групп точек в каждом из фильтров. Из общей выборки поочередно удалялись и впоследствии возвращались обратно сначала группы из нескольких точек, позже группы точек, соответствующих нескольким дням наблюдений. Ввиду незначительных отклонений в статистике хи-квадрат можно сделать вывод, что вклад в статистику вносят не одна малая группа данных, а вся выборка в целом.

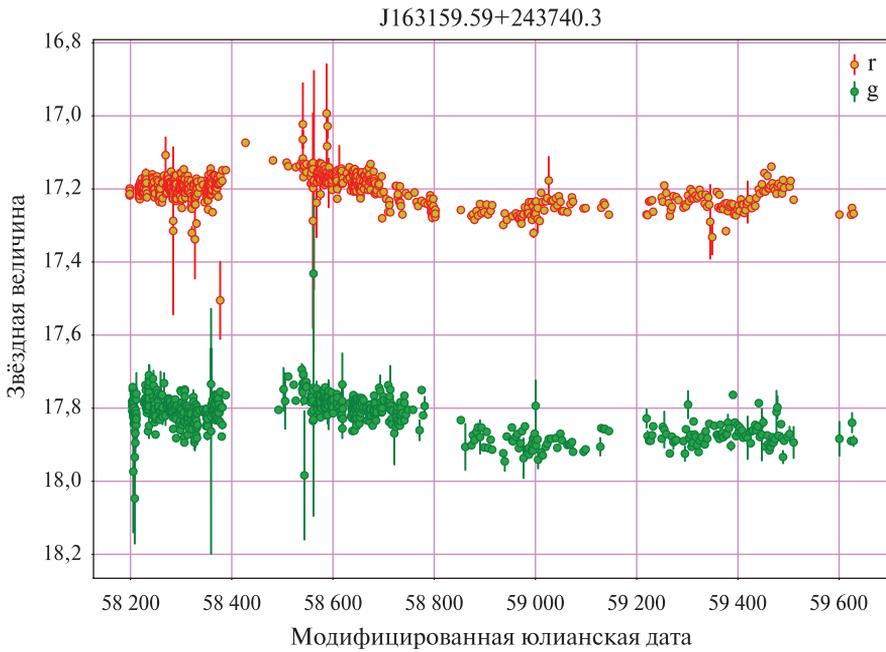


Рис. 2. Кривая блеска, построенная по необработанным данным от ZTF Forced Photometry Service (не был применён ни один из описанных выше методов коррекции)

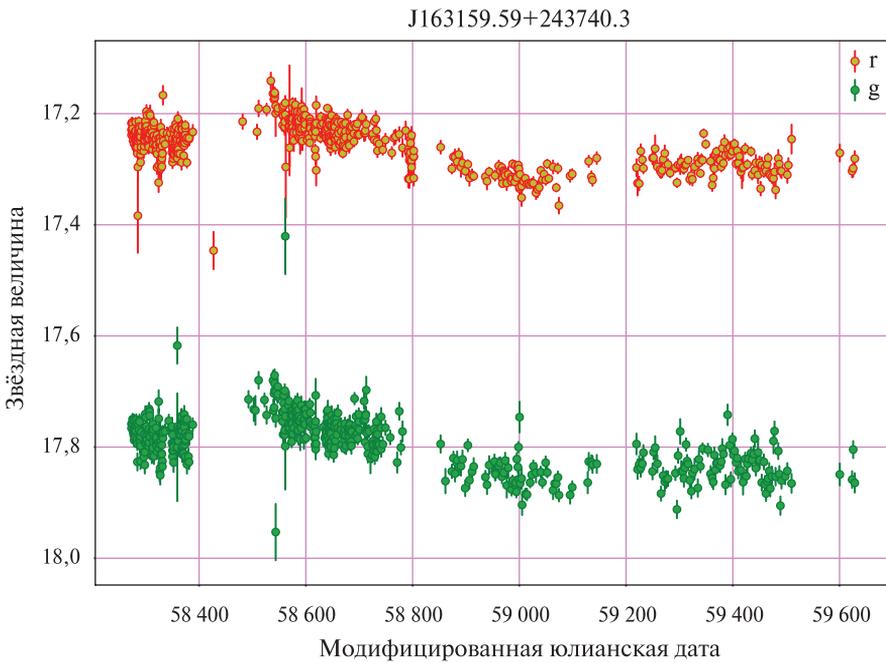


Рис. 3. Кривая блеска без применения к ней фильтрации не фотометрических данных. Часть точек в начале кривой блеска не учитывается по причине отсутствия данных по звёздам сравнения для этих дат

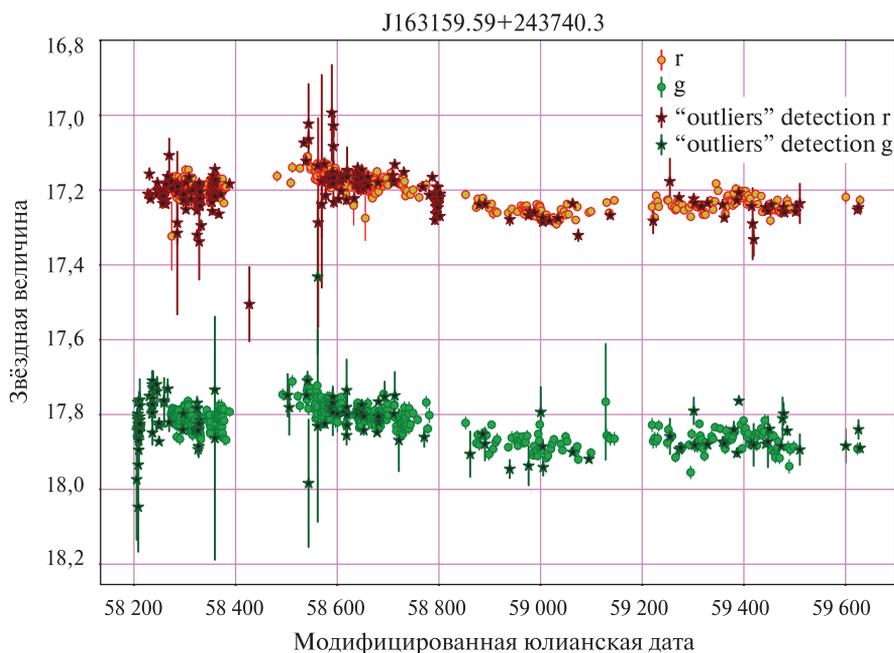


Рис. 4. Кривая блеска без применения к ней коррекции цвета. Часть точек в начале кривой блеска не учитывается по причине отсутствия данных по звёздам сравнения для этих дат

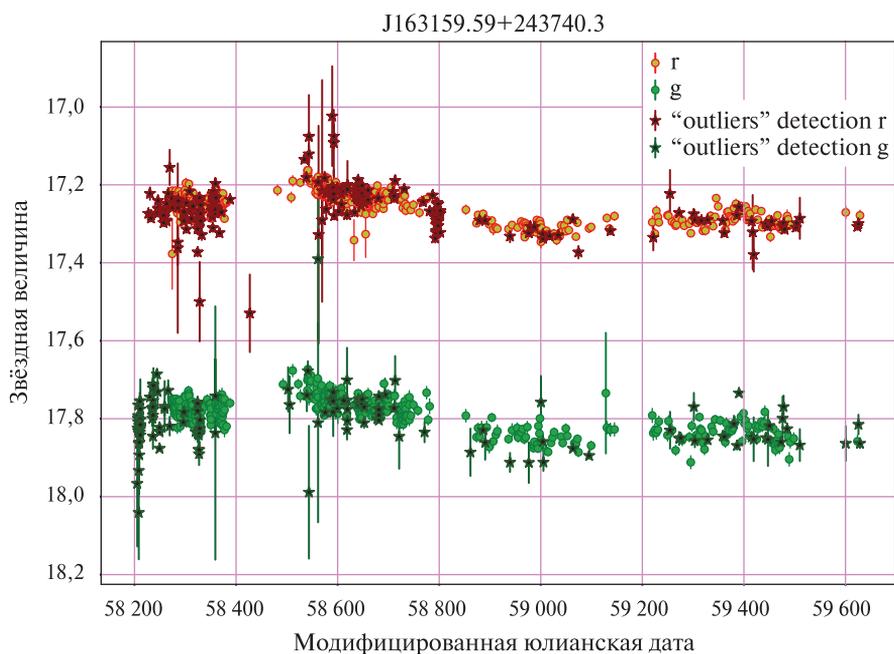


Рис. 5. Кривая блеска без применения к ней коррекции сдвига нуль-пунктов. Часть точек в начале кривой блеска не учитывается по причине отсутствия данных по звёздам сравнения для этих дат

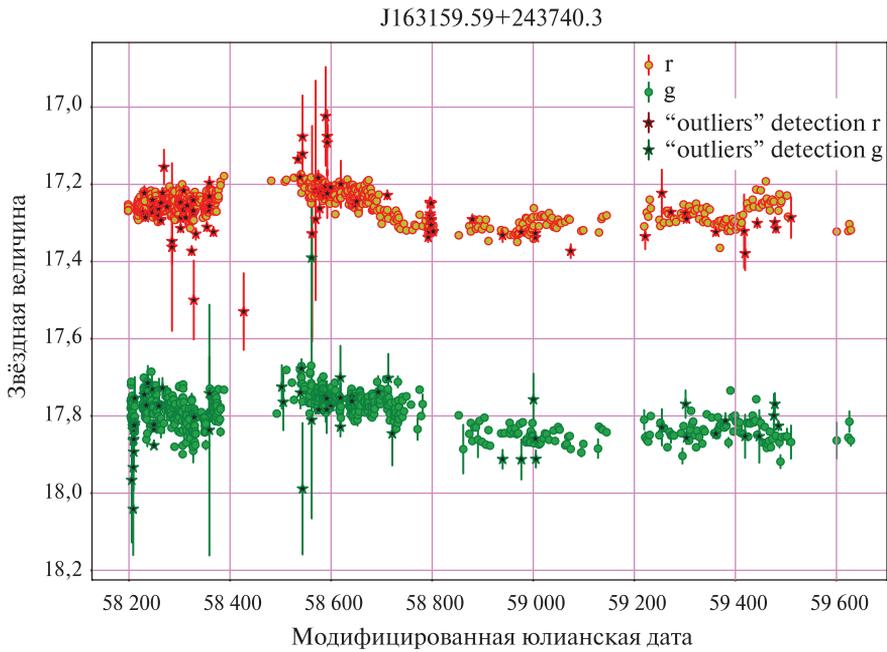


Рис. 6. Кривая блеска без применения к ней коррекции по медианной звезде сравнения. (Magnitude — звёздная величина, MJD — модифицированная юлианская дата)

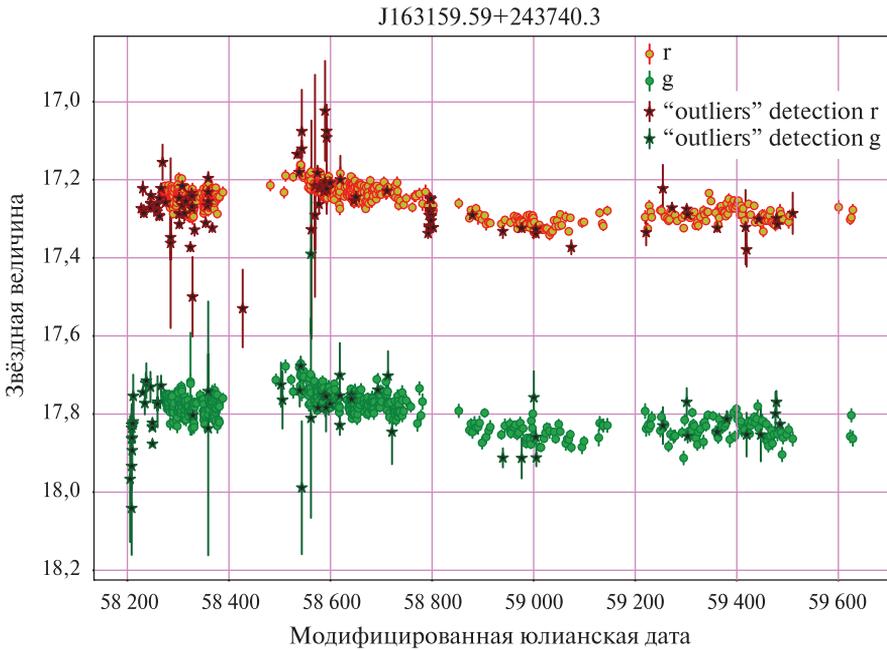


Рис. 7. Кривая блеска с применённой к ней коррекцией по всем описанным выше пунктам. Часть точек в начале кривой блеска не учитывается по причине отсутствия данных по звёздам сравнения для этих дат. (Magnitude — звёздная величина, MJD — модифицированная юлианская дата)

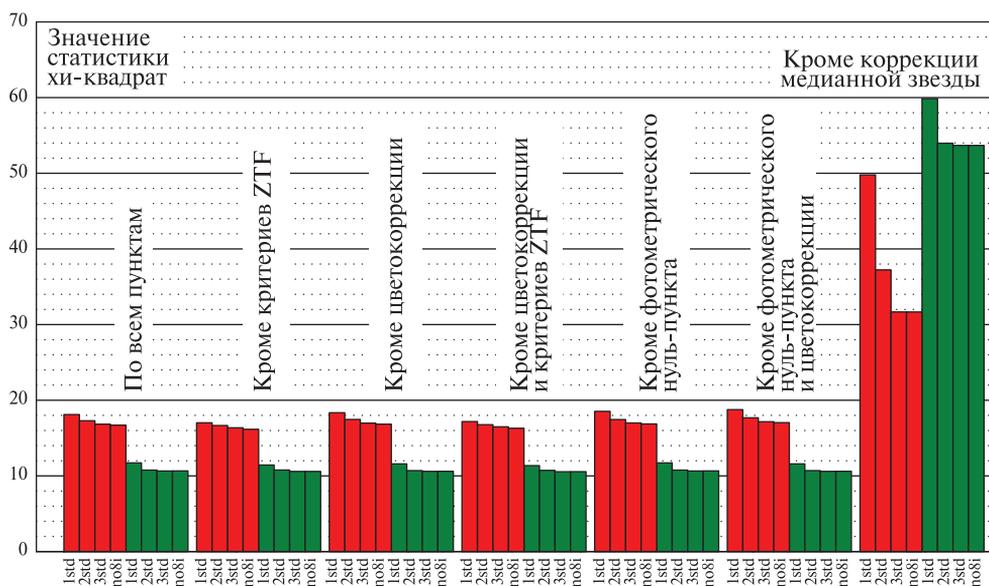


Рис. 8. Статистика хи-квадрат в двух фотометрических полосах при разных методах фильтрации/коррекции. Разным столбцам для каждого метода коррекции соответствует разная степень фильтрации не фотометрических данных (1 σ , 2 σ , 3 σ и без фильтрации)

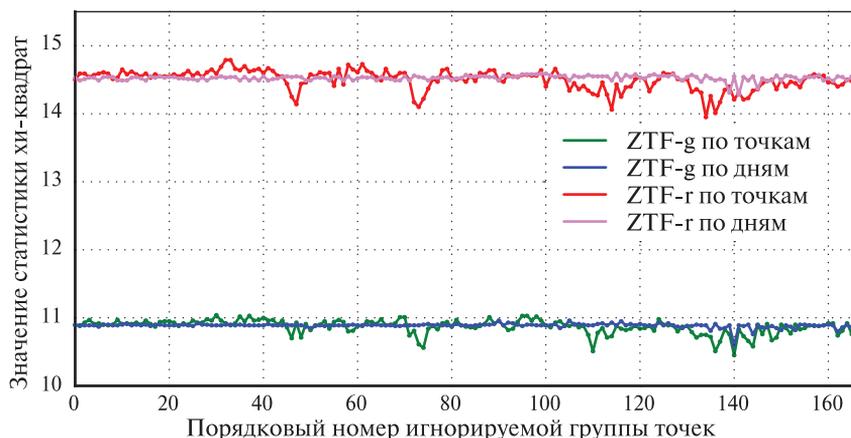


Рис. 9. График значения статистики хи-квадрат в двух фотометрических полосах при игнорировании определённых групп точек в каждом из фильтров

ВЫВОДЫ

На примере объекта J163159.59+243740.3 показан значительный вклад в фотометрическую коррекцию введения опорной звезды. Переменность объекта регистрируется в обеих фотометрических полосах в том числе и после вычитания медианной звезды. Игнорирование групп случайных точек кривой блеска также не изменяет выводов о переменности объекта. Применяя вышеописанные методы обработки данных и используя общедоступные обзоры неба, возможно обнаружение и подтверждение большого количества кандидатов в AGN I-го типа.

В ближайшем будущем возможна проверка данного метода подтверждения кандидатов в AGN I-го типа на данных с 60-см телескопа RC600 (Shatsky et al., 2020). Кавказской горной обсерватории МГУ (КГО). А также будет проведена оценка масс центральных чёрных дыр промежуточных масс с помощью фильтров Na и метода реверберации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00281-П).

ЛИТЕРАТУРА

- Chilingarian I. V., Katkov I. Yu., Zolotukhin I. Yu., Grishin K. A., Beletsky Yu., Boutsia K., Osip D. J.* A Population of Bona Fide Intermediate-mass Black Holes Identified as Low-luminosity Active Galactic Nuclei // *The Astrophysical J.* 2018. V. 863. Iss. 1. Art. Id. 1. 16 p.
- Demianenko M., Grishin K., Toptun V., Chilingarian I., Katkov I., Goradzhanov V., Kuzmin I.* Optical Variability of “Light-weight” Supermassive Black Holes at a Few Percent Level from ZTF Forced-Photometry Light Curves // arXiv preprint. 2022. arXiv:2201.03712. 4 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.03712>.
- Masci F. J., Laher R. R., Rusholme B., Shupe D. L., Groom S., Surace J., Jackson E., Monkewitz S., Beck R., Flynn D., Terek S., Landry W., Hacopians E., Desai V., Howell J., Brooke T., Imel D., Wachter S., Ye Q.-Z., Lin H.-W., Cenko S. B., Cunningham V., Rebbapragada U., Bue B., Miller A. A., Mahabal A., Bellm E. C., Patterson M. T., Jurić M., Golkhou V. Z., Ofek E. O., Walters R., Graham M., Kasliwal M. M., Dekany R. G., Kupfer Th., Burdge K., Cannella Ch. B., Barlow T., Sistine A. V., Gioni M., Fremling Ch., Blagorodnova N., Levitan D., Riddle R., Smith R. M., Helou G., Prince Th. A., Kulkarni S. R.* The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive // arXiv preprint. 2019. arXiv:1902.01872. 30 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.01872>.
- Shatsky N. I., Belinski A. A., Dodin A. V., Zheltoukhov S. G., Kornilov V. G., Postnov K. A., Potanin S. A., Safonov B. S., Tatarnikov A. M., Cherepashchuk A. M.* The Caucasian Mountain Observatory of the Sternberg Astronomical Institute: First Six Years of Operation // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century: Proc. All-Russian Conf.* 2020. P. 127–132. DOI: 10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_127.

COMPARISON OF POST-PROCESSING METHODS OF ZTF LIGHT CURVES FOR THE BINARY INTERMEDIATE-MASS BLACK HOLE J163159.59+243740.3.

D. A. Matveev^{1,2}, *M. V. Demianenko*^{2,3,5}, *I. V. Chilingarian*^{2,4}, *K. A. Grishin*^{2,7}, *I. Yu. Katkov*^{2,6}, *V. S. Goradzhanov*^{1,2}, *V. A. Toptun*^{1,2}, *I. A. Kuzmin*^{1,2}

¹ Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia, Physical Faculty, Moscow, Russia

² Sternberg Astronomical Institute Moscow University (SAI), Moscow, Russia

³ Higher School of Economics National Research University (HSE University), Moscow, Russia

⁴ Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA), Cambridge, USA

⁵ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

⁶ New York University Abu Dhabi (NYUAD), Abu Dhabi, UAE

⁷ University of Paris, Laboratory Astroparticle and Cosmology (APC), Paris, France

The analysis of methods for processing light curves obtained using the Zwicky Transient Facility (ZTF) Forced Photometry service is presented. The ZTF data has imperfect photometry. For this reason, methods aimed at eliminating non-existent trends in the light curves and suppressing other effects that prevent identifying the real variability in two photometric bands (ZTF-g,

ZTF-r) are considered. Important steps in processing two-dimensional time series include: filtering points by discarding incorrect observations according to criteria from the ZTF photometry instructions, color correction and correction of the photometric null point, correction by subtracting the median comparison star obtained from the 50 stars closest to the source in the image.

Keywords: active galactic nuclei, intermediate-mass black holes.

Matveev Dmitrii Alexandrovich — student, matveev.da21@physics.msu.ru

Demianenko Mariia Vladimirovna — master's degree student

Chilingarian Igor Vladimirovich — leading researcher,
doctor of physical and mathematical sciences

Grishin Kirill Alekseevich — postgraduate, junior researcher

Katkov Ivan Yurievich — senior researcher, doctor of physical and mathematical sciences

Goradzhyanov Vladimir Sergeevich — student

Toptun Victoria Alekseevna — student

Kuzmin Ivan Alekseevich — student

ТОЛЩИНА КОРЫ ВЕНЕРЫ МЕТОДОМ НАГРУЗОЧНЫХ ЧИСЕЛ ЛЯВА

Т. И. Менщикова¹, А. В. Батов^{1,2}, Т. В. Гудкова¹

¹ Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

² Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН)
Москва, Россия

В настоящей работе для расчёта толщины коры Венеры применяется метод чисел Лява. Метод учитывает подстройку планетных недр к нагрузкам на поверхности и в недрах. Численное моделирование проводится с использованием разложения по сферическим гармоникам данных топографии и гравитационного поля до 70-й степени. Проведено сравнение с имеющимися глобальными моделями коры Венеры.

Ключевые слова: гравитационное поле, топография, кора, нагрузочные числа Лява, Венера

На Земле глубинное строение коры изучается на основе совместной интерпретации сейсмических данных и данных гравиметрии. В отсутствии сейсмической сети на планетах создание плотностной модели коры базируется на решении обратной задачи гравиметрии. Для устранения неопределённости решения, возникающей при построении глобальной модели толщины коры на основе решения обратной задачи, принимаются некоторые допущения. Одним из них становится предположение, что наблюдаемое гравитационное поле возникает за счёт рельефа на поверхности и рельефа границы кора – мантия, и что величины средней плотности коры и мантии известны, т. е. задаётся скачок плотности на границе кора – мантия. Дополнительно используется предположение о толщине коры в какой-нибудь области.

Для решения этой задачи обычно используется два метода, подробно изложенные в обзоре (Wiczorek, 2015): один основан на моделировании соотношения между гравитационными данными и данными топографии для определённого района в спектральной области, другой — на моделировании отношения геоид – топография (*англ.* Geoid-to-topography ratios, GTR) в пространственной области. Главный недостаток первого метода — низкое спектральное разрешение планетных данных для проведения локального спектрального анализа. Второй метод доказал свою полезность при оценке средней толщины коры планеты, но необходимо учитывать, что при его применении рассматриваемый регион должен быть достаточно большим, поскольку отношение GTR, в большей степени, определяется для длинноволновых компонент геоида и топографии, и наблюдаемое значение может быть искажено длинноволновыми структурами, которые не связаны с предполагаемой моделью компенсации (например, латеральные аномалии плотности в мантии).

В настоящей работе моделирование толщины коры Венеры основано на данных топографии и гравитационного поля и проводится методом чисел Лява (Август Эдуард Хьюг Ляв — *англ.* Augustus Edward Hough Love), разработанным в работах (Жарков, Марченков, 1987; Жарков и др., 1986; Марченков, Жарков, 1989; Марченков и др., 1984). Используемый метод учитывает глобальную деформацию недр планеты: подстройку планетных недр к нагрузкам и на поверхности,

Менщикова Тамара Ивановна — научный сотрудник, аспирант, ms.tamm@mail.ru

Батов Алексей Владимирович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, batov@ipu.ru

Гудкова Тамара Васильевна — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, gudkova@ifz.ru

и в недрах. Вариации границы кора – мантия предполагают частичную изостатическую компенсацию по Эйри (Сэр Джордж Биддель Эйри — *англ.* Sir George Biddell Airy).

Полагаем, что источниками аномального гравитационного поля выступают некоторым образом распределённые на поверхности и в недрах планеты аномалии плотности $\delta\rho(r, \varphi, \lambda)$, которые можно представить в виде бесконечно тонкого сферического слоя радиуса r :

$$\delta\rho(r, \varphi, \lambda) = \sum_{i,n,m} R_{inn}(r) Y_{inn}(\varphi, \lambda) = \sum_{i=1}^2 \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n R_{inn}(r) Y_{inn}(\varphi, \lambda), \quad (1)$$

где $Y_{inn}(\varphi, \lambda) = P_{nm}(\sin\varphi) \begin{cases} \cos(m\lambda), & i=1, \\ \sin(m\lambda), & i=2; \end{cases}$ P_{nm} — присоединённые полиномы Лежандра; φ и λ — широта и долгота, соответственно; R_{inn} — амплитуда аномальных волн плотности, размерность $M \cdot L^{-2}$.

Метод нагрузочных коэффициентов учитывает, что при добавлении аномальной массы (аномальной волны плотности) происходит глобальная деформация планеты и искривление границ раздела.

Аномальный слой, который действует на планету как нагрузка, приводит к дополнительному возмущению потенциала:

$$\Delta V = 4\pi GR \sum_{i,n,m} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{n+2} \frac{R_{inn}(r)(1+k_n(r))}{2n+1} Y_{inn}(\varphi, \lambda), \quad (2)$$

где G — гравитационная постоянная; R_0 — средний радиус планеты; $k_n(r)$ — нагрузочные числа порядка n для заглублённой на глубине r аномалии плотности.

Деформация планеты $D(\varphi, \lambda)$ под действием нагрузки связана с нагрузочными числами h_n :

$$D = \frac{4\pi GR}{g_0} \sum_{i,n,m} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{n+2} \frac{R_{inn}(r)(1+h_n(r))}{2n+1} Y_{inn}(\varphi, \lambda), \quad (3)$$

где g_0 — гравитационное ускорение на поверхности планеты.

Планета моделируется как упругое самогравитирующее тело с зависящими от радиуса плотностью, модулем сжатия и модулем сдвига, находящееся под действием возмущающей нагрузки. Возмущающей нагрузкой выступают аномалии плотности на поверхности планеты (вес рельефа планеты, отсчитанного от эквипотенциальной поверхности) и на границе кора – мантия (заглублённые аномалии) (рис. 1). Эти аномальные волны плотности (аномальные массы) представляют собой утолщение или утонение коры на указанных уровнях.

Данный метод тестировался нами для определения толщины Марса (Батов и др., 2022) и сравнён с результатами, полученными в работе (Wieczorek et al., 2019), при этом для получения модельных вариаций толщины коры Марса использовалась реперная точка из допустимого диапазона значений толщины коры в месте установки сейсмометра миссии InSight (*англ.* Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport).

Оценки коры Венеры проводятся для нескольких вариантов моделей неоднородной упругости. Выбор моделей неоднородной упругости можно найти в работе (Менщикова, Гудкова, 2021).

Модели внутреннего строения Венеры имеют значительный разброс параметров из-за неопределённости состава коры и мантии (Гудкова, Жарков, 2020; Dumoulin et al., 2017). Для расчётов примем плотность коры равной 2800 кг/м^3 , скачок плотности — 500 кг/м^3 по модели внутреннего строения

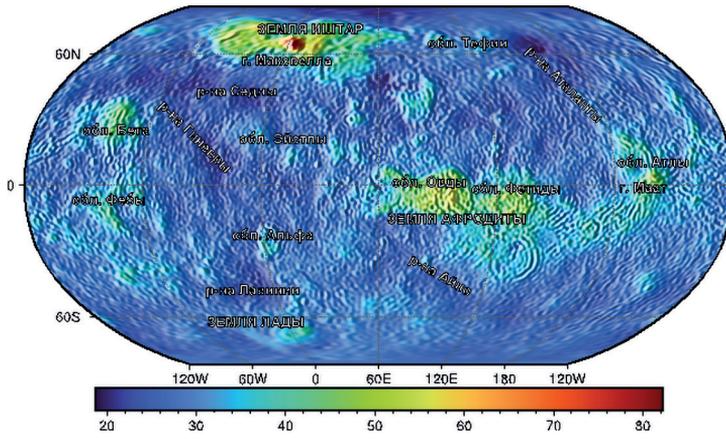


Рис. 3. Толщина коры Венеры для модели V16_30_V_lith100 со средней толщиной коры 30 км. Модель с толщиной литосферы 100 км

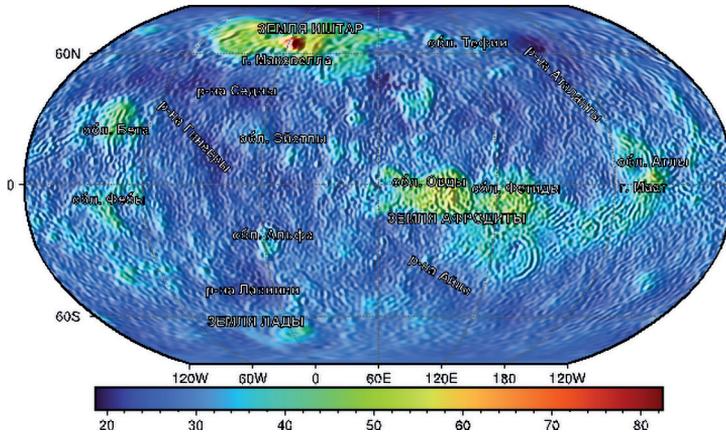


Рис. 4. Толщина коры Венеры для модели V16_30_V_lith300 со средней толщиной коры 30 км. Модель с толщиной литосферы 300 км

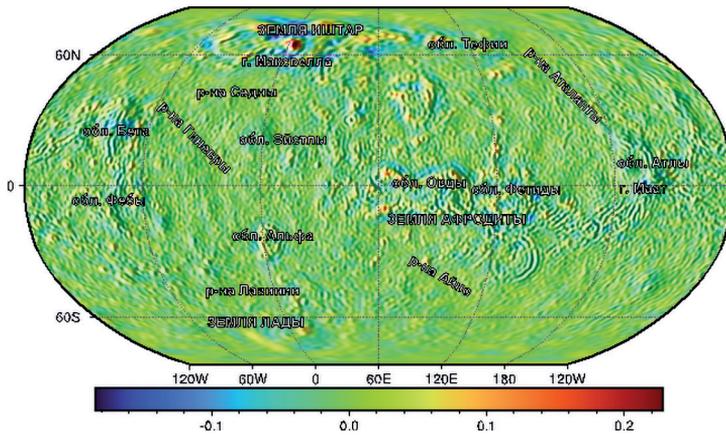


Рис. 5. Разница между моделями V16_30_V_lith300 и V16_30_V_lith100

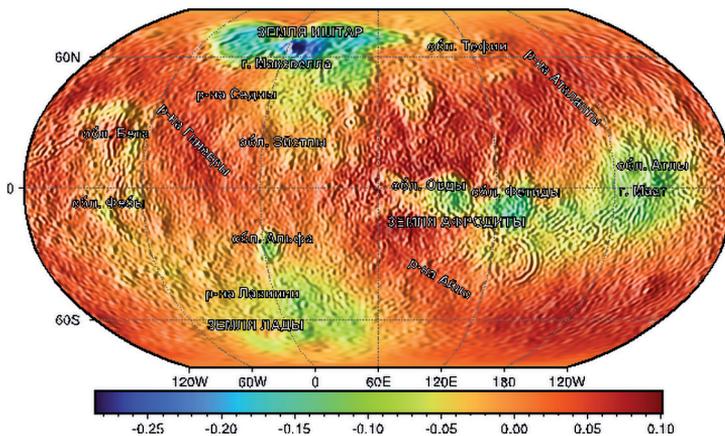


Рис. 6. Разница между моделями V16_30_B_lith300 и V16_30_A

Из приведённых рисунков видно, что толщина коры на Венере тесно связана с топографическими структурами. Кора Венеры изостатически скомпенсирована, в районе низменностей кора тоньше, а в районе возвышенностей наблюдается её утолщение (корни поднятий Земли Иштар (*лат.* Ishtar Terra), Земли Афродиты (*лат.* Aphrodite Terra), области Овды (*лат.* Ovda), Тефии (*лат.* Tethus Regio) и некоторых других). Эти результаты согласуются с выводами (Hansen et al., 1999; Ivanov, Head, 2011), где отмечено, что если сравнить области с толстой корой, рассчитанными в предположении изостазии, с распределением высокогорных плато и тессер, то можно увидеть корреляцию. Минимальная толщина коры 18,6 км получена для равнины Аталанты (*лат.* Atalanta Planitia). Максимальная глубина границы кора – мантия (82,3 км), получена под горами Максвелла (*лат.* Maxwell Montes) на Земле Иштар. Толщина коры под равнинами составляет около 20–30 км, под вулканическими поднятиями Атла (*лат.* Atla Regio) и Бета (*лат.* Beta Regio) толщина коры достигает 48 км (гора Маат — *лат.* Maat Mons), 47,4 км (гора Реи — *лат.* Rhea Mons) и 46,5 км (гора Теи — *лат.* Theia Mons). В работе (Yang et al., 2016) было отмечено, что в вулканические поднятия существенный вклад может вносить динамическая поддержка, которая не учтена в данной работе, поэтому эти значения толщины могут быть несколько меньше реальных.

ЛИТЕРАТУРА

- Батов А. В., Менщикова Т. И., Гудкова Т. В. Модельные вариации толщины коры Марса и Венеры методом чисел Лява // *Астрон. вестн.* 2022. (В печати.)
- Гудкова Т. В., Жарков В. Н. Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 2020. Т. 54. № 1. С. 24–32. DOI: 10.31857/S0320930X20010041.
- Жарков В. Н., Марченков К. И. О корреляции касательных напряжений в литосфере Венеры с поверхностными структурами // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 1987. Т. 21. № 2. С. 170–175.
- Жарков В. Н., Марченков К. И., Любимов В. М. О длинноволновых касательных напряжениях в литосфере и мантии Венеры // *Астрон. вестник. Исслед. Солнечной системы.* 1986. Т. 20. № 3. С. 202–211.
- Марченков К. И., Жарков В. Н. О рельефе границы кора-мантия и напряжениях растяжения-сжатия в коре Венеры // *Письма в Астрон. журн.* 1989. Т. 15. № 2. С. 182–190.

- Марченков К. И., Любимов В. М., Жарков В. Н.* Расчет нагрузочных коэффициентов для заглубленных аномалий плотности // Докл. АН СССР. 1984. Т. 15. № 2. С. 583–586.
- Менщикова Т. И., Гудкова Т. В.* Нагрузочные числа Лява для различных моделей неоднородной упругости Венеры // Геофиз. исслед. 2021. Т. 22. № 4. С. 24–42.
- Dumoulin C., Tobie G., Verhoeven O., Rambaux N.* Tidal constraints on the interior of Venus // *J. Geophysical Research: Planets*. 2017. V. 122. Iss. 6. P. 1338–1352. <https://doi.org/10.1002/2016JE005249>.
- Hansen V. L., Banks B. K., Ghent R. R.* Tessera terrain and crustal plateaus // *Venus. Geology*. 1999. V. 27. Iss. 12. P. 1071–1074. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<1071:TTACPV>2.3.CO;2.
- Ivanov M. A., Head J. W.* Global geological map of Venus // *Planetary and Space Science*. 2011. V. 59. Iss. 13. P. 1559–1600. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.07.008>.
- Wieczorek M. A.* Gravity and topography of the terrestrial planets // *Treatise on geophysics. Planets and Moons* / ed. Spohn T. Amsterdam: Elsevier, 2015. V. 10. P. 153–193.
- Wieczorek M. A., Beuthe M., Rivoldini A., Van Hoolst T.* Hydrostatic interfaces in bodies with non-hydrostatic lithospheres // *J. Geophysical Research: Planets*. 2019. V. 124. P. 1410–1432. <https://doi.org/10.1029/2018JE005909>.
- Yang A., Huang J., Wei D.* Separation of dynamic and isostatic components of the Venusian gravity and topography and determination of the crustal thickness of Venus // *Planetary and Space Science*. 2016. V. 129. P. 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.06.001>.

THE THICKNESS OF THE CRUST OF VENUS WITH LOAD LOVE NUMBERS

*T. I. Menshchikova*¹, *A. V. Batov*^{1,2}, *T. V. Gudkova*¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS (IPE RAS), Moscow, Russia

² V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS (ICS RAS), Moscow, Russia

The method of Love numbers is used to calculate the thickness of the crust of Venus. The method takes into account the adjustment of the planetary subsurface to the loads on the surface and in the subsurface. Numerical modeling is carried out using spherical harmonic expansion of topography and gravitational field data up to the 70th degree. A comparison is made with the available global models of the Venus crust.

Keywords: gravity field, topography, crust, load Love numbers, Venus

Menshchikova Tamara Ivanovna — researcher, postgraduate, ms.tamm@mail.ru

Batov Alexey Vladimirovich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences, batov@ipu.ru

Gudkova Tamara Vasilievna — chief researcher, doctor of physical and mathematical sciences, gudkova@ifz.ru

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ИНСТРУМЕНТА OMI ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ

Е. И. Митюкова, М. Ю. Червяков

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия

Данные радиозондирования атмосферы по температуре воздуха позволяют детектировать в средней стратосфере внезапные стратосферные потепления, а также проследживать изменчивость температуры во время этих событий на различных уровнях. Полученные результаты свидетельствуют об общем характере изменений озона в ряде зим с внезапными стратосферными потеплениями. Причина этих изменений связана, вероятно, с общими особенностями эволюции полярных вихрей и развития планетарных волн. Рассмотрены временные вариации общего содержания озона и температуры воздуха средней стратосферы в зимний период времени, в том числе во время событий внезапных стратосферных потеплений.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, радиозонд, общее содержание озона

Температурный режим стратосферы существенным образом меняется вследствие внезапных стратосферных потеплений (ВСП) — повышения температуры «взрывного характера» в полярной и субполярной стратосфере зимой в течение нескольких суток и более. Для изучения таких случаев в работе использовался архив данных радиозондирования университета Вайоминга (*англ.* University of Wyoming). Наблюдения с помощью радиозондов проводятся в стандартные сроки: 00:00 и 12:00 по Гринвичу (Червяков, 2019; Червяков, Шаркова, 2019; Червяков и др., 2019). Результатами запусков радиозондов выступают данные о вертикальном распределении температуры и других метеопараметров на каждой стандартной изобарической поверхности вплоть до высоты 10 гПа и выше (Шаркова, Червяков 2018, 2020а, б).

В ходе работы была проанализирована температура воздуха нижней и средней стратосферы для аэрологических станций с различными климатическими условиями арктического региона: аэрологических станций «Виллойск», «Ханты-Мансийск», «Алдан», «Тикси», «Верхоянск», «Виллойск», «Оленек», «Салехард» и «ГМО им. Е. К. Федорова» (гидрометеообсерватория).

Сведения о местоположении центра ВСП были найдены по данным сайта <https://earth.nullschool.net>, где размещена визуализация глобальных погодных условий (Капцова, Червяков 2021).

Для каждого случая ВСП оценивалось общее содержание озона (ОСО) по данным спутникового прибора OMI (*англ.* Ozone Monitoring Experiment), размещённых на сайте NASA Earth Observations (<https://neo.gsfc.nasa.gov>) для регионов близких к выбранным станциям радиозондирования. Для каждого пункта была оценена синхронная изменчивость температуры на уровнях 10, 20 и 30 гПа и ОСО (Капцова, Червяков, 2020а).

На рис. 1 приведён временной ход температуры и ОСО в зимний период времени 2011–2012 гг. для изобарических поверхностей 30, 20 и 10 гПа для станции Виллойск.

Митюкова Елизавета Игоревна — студент магистратуры, captsova.elizaveta@gmail.com
Червяков Максим Юрьевич — заведующий кафедрой метеорологии и климатологии, кандидат географических наук

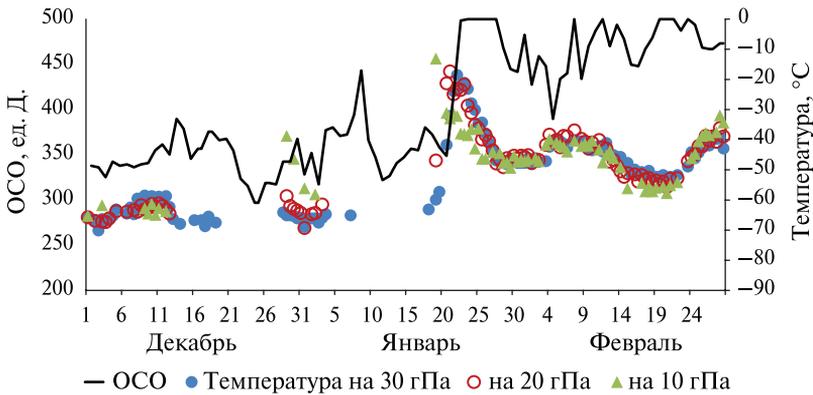


Рис. 1. Изменчивость температуры в средней стратосфере и ОСО в 2011–2012 гг. над станцией Вилюйск

Как видно из графика, временной ход температуры и ОСО практически не совпадают. Отмечается рост ОСО в момент возникновения потепления, однако при постепенном восстановлении низких температур после ВСП содержание озона в стратосфере по-прежнему велико. Это подтверждает и корреляция между ОСО и температурой на изобарической поверхности 30 гПа, график которой представлен на рис. 2.

Из графика временного хода температуры и ОСО видно, что существует определённое сходство изменения температуры и ОСО на уровнях 30, 20 и 10 гПа. Рост температуры и рост ОСО в период ВСП происходит практически одновременно.

На рис. 3 изображены диаграммы, показывающие, как меняется коэффициент корреляции в зависимости от временного сдвига ряда ОСО относительно ряда температуры на уровнях 30, 20 и 10 гПа для станции Вилюйск. Ряд ОСО сдвигался на 10 сут в обе стороны.

При положительном сдвиге ОСО наблюдался рост, а затем незначительное падение значений кросс-корреляции для всех изобарических поверхностей. Максимальное значение коэффициента корреляции для 30 и 20 гПа было при сдвиге на два дня и составило 0,87 и 0,82 соответственно. Максимальное значение коэффициента корреляции для 10 гПа отмечалось при сдвиге на три дня и составило 0,61. При отрицательном сдвиге ОСО наблюдается уменьшение значений кросс-корреляции для всех изобарических поверхностей.

В целом корреляция между температурой и общим содержанием озона зимой на уровне 30 гПа для других выбранных станций в среднем составляла от 0,73 до 0,78. В период ВСП может наблюдаться рост ОСО в стратосфере на уровнях 30, 20 и 10 гПа. Однако происходит это не всегда.

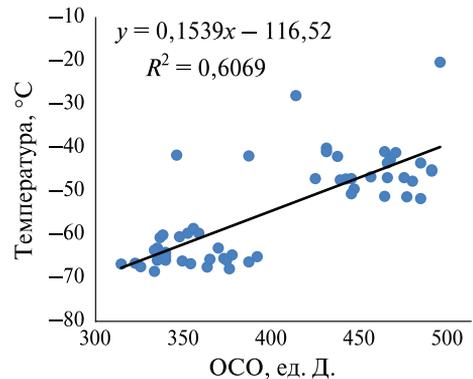


Рис. 2. Корреляционная диаграмма связи ОСО и температуры воздуха на высоте 30 гПа в 2011–2012 гг. над станцией Вилюйск

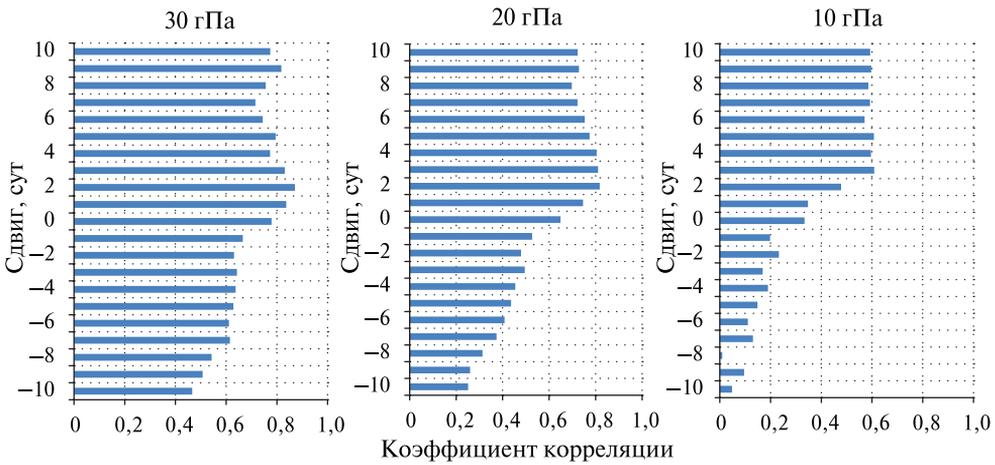


Рис. 3. Коэффициенты кросс-корреляции для ОСО и температуры воздуха на уровнях 30, 20 и 10 гПа для станции Вилюйск за период с января 2011 г. по февраль 2012 г.

Значительно чаще наблюдается более высокие значения ОСО после ВСП. Значения ОСО превышают значения после данного явления на 100–150 ед. Д. (единиц Добсона), что может предположительно объясняться особенностями атмосферной циркуляции (Капцова, Червяков, 2020б).

ЛИТЕРАТУРА

- Капцова Е. И., Червяков М. Ю. Анализ внезапных стратосферных потеплений в Арктике по данным радиозондов // Молодежь. Наука. Инновации: сб. докл. 68-й Международ. молодеж. научно-техн. конф. 16–18 дек. 2020. Т. 1. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2021. С. 457–461.
- Капцова Е. И., Червяков М. Ю. (2020а) Анализ некоторых случаев внезапных стратосферных потеплений по данным радиозондирования атмосферы и оценка связи температуры с общим содержанием озона // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 16–20 нояб. 2020, М.: ИКИ РАН. 2020. С. 155. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- Капцова Е. И., Червяков М. Ю. (2020б) Выявление некоторых случаев внезапных стратосферных потеплений по данным радиозондирования атмосферы и спутникового спектрометра OMI // Системы контроля окружающей среды – 2020: тез. докл. Международ. научно-техн. конф. Севастополь, 9–12 нояб. 2020. Севастополь: ИП Куликов А. С., 2020. С. 17.
- Червяков М. Ю. Зондирование атмосферы: учебно-метод. пособие для студентов, обучающихся по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология. Саратов: ИЦ «Наука», 2019. 62 с.
- Червяков М. Ю., Шаркова С. А. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным радиозондирования атмосферы // Изв. Саратовского ун-та. Новая сер. Сер.: «Науки о Земле». 2019. Т. 19. № 1. С. 42–48. DOI 10.18500/1819-7663-2019-19-1-42-48.
- Червяков М. Ю., Шаркова С. А., Спиряхина А. А., Суркова Я. В., Нейштадт Я. А. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным дистанционного радиозондирования атмосферы // Материалы 17-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ

РАН, 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 233. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.

Шаркова С. А., Червяков М. Ю. Исследование изменчивости характеристик тропопаузы в арктической зоне по данным радиозондирования // Молодежь. Наука. Инновации: сб. докл. 66-й Международ. молодеж. научно-техн. конф. 26–28 нояб. 2018. Т. 2. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2018. С. 87–92.

Шаркова С. А., Червяков М. Ю. (2020a) Динамика тропопаузы над территорией северных широт по радиозондовым данным // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва, 16–20 нояб. 2020, М.: ИКИ РАН. 2020. С. 191. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.

Шаркова С. А., Червяков М. Ю. (2020b) Оценка многолетней изменчивости параметров тропопаузы северных широт // Системы контроля окружающей среды – 2020: тез. докл. Международ. научно-техн. конф. Севастополь, 9–12 нояб. 2020. Севастополь: ИП Куликов А. С., 2020. С. 47.

VARIABILITY IN TOTAL ATMOSPHERIC OZONE FROM OMI SATELLITE DATA DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMS

E. I. Mityukova, M. Yu. Chervyakov

Saratov State University (SSU), Saratov, Russia

Atmospheric radio sounding data of temperature can be used to detect sudden stratospheric warmings in the middle stratosphere, as well as to track temperature variability during these events at various height levels. The results obtained indicate the general nature of ozone changes in several winters with sudden stratospheric warmings. The reason for these changes is probably associated with the general features of the evolution of polar vortices and the development of planetary waves. Temporal variations of the total ozone content and air temperature of the middle stratosphere in the winter period, including during sudden stratospheric warming events, are considered.

Keywords: sudden stratospheric warming, radiosonde, total ozone

Mityukova Elizaveta Igorevna — master's degree student, captsova.elizaveta@gmail.com

Chervyakov Maxim Yurievich — head of department of meteorology and climatology, candidate of geographic sciences

ВЛИЯНИЕ МЁРТВОГО ВРЕМЕНИ НА ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В КОМПТОНОВСКИХ ДЕТЕКТОРАХ

А. А. Мкртчян¹, А. С. Позаненко², П. Ю. Минаев²

¹ Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный, Россия

² Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

Исследуется влияние мёртвого времени на измерения линейной поляризации в гамма-диапазоне сцинтилляционными детекторами. Мёртвое время детектора влияет на статистику регистрации и, как следствие, на точность измерения не только потока, но и степени линейной поляризации. Для упрощённой модели сегментированного сцинтилляционного детектора рассмотрено влияние мёртвого времени на точность измерения поляризации. Оценка влияния мёртвого времени актуальна для измерения мощных транзитных событий, таких как космические гамма-всплески (GRB) и гамма-вспышки земного происхождения (TGF).

Ключевые слова: мёртвое время, гамма-всплески (GRB), гамма-вспышки земного происхождения (TGF), линейная поляризация, комптоновский поляриметр

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматривается влияние мёртвого времени на измерение поляризации в гамма-диапазоне сцинтилляционными детекторами. По крайней мере есть два класса источников, для которых измерение поляризации может ограничить класс моделей излучения: космические гамма-всплески (GRB) и гамма-вспышки земного происхождения (TGF). В этих источниках пиковая скорость счёта в детекторах может быть значительной, и приближаться к обратной величине мёртвого времени детектора. В этих условиях измерение степени линейной поляризации будет осложняться влиянием мёртвого времени.

Краткий обзор гамма-телескопов для измерения поляризации приведён в таблице.

Эксперименты, позволяющие измерять поляризацию в гамма-диапазоне

Эксперимент	Время работы	Энергетический диапазон	Результаты измерений поляризации	Ссылка
COMPTEL	1991–2000	1–30 МэВ	–	(Strong et al., 2019)
IKAROS	2010–2015	50–300 кэВ	Поляризация 3 GRB	(Yonetoku et al., 2010)
POLAR	2016–2017	50–500 кэВ	Поляризация 31 GRB	(Xiao et al., 2019)
SPI	2002–н. в.	20 кэВ–8 МэВ	Возможная поляризация GRB 041219	(Chauvin et al., 2018)

Измерение поляризации сцинтилляционными детекторами осложнено существенно меньшей статистикой регистрируемых фотонов, испытывающих комптоновское рассеяние в одном детекторе и фотопоглощение в другом (в дальнейшем — комптоновские фотоны). Действительно, для регистрации

Мкртчян Аркадий Ашотович — студент, mkr.aa@phystech.edu

Позаненко Алексей Степанович — кандидат физико-математических наук

Минаев Павел Юрьевич — кандидат физико-математических наук

комптоновского фотона необходима его фиксация как минимум в двух детекторах, что уменьшает статистику (в прямой моде регистрации статистика пропорциональна суммарной эффективности всех процессов поглощения, для энергий до 1 МэВ — $N(\xi_1(E) + \xi_2(E))$, а в комптоновской моде — $N \cdot \xi_1(E) \cdot \xi_2(E)$, где ξ_1 — квантовая эффективность комптоновского рассеяния; ξ_2 — квантовая эффективность фотопоглощения; E — энергия фотона; N — количество падающих на детектор фотонов). С другой стороны, фоновых фотонов в комптоновской моде существенно меньше за счёт необходимости совпадения времени регистрации одновременных фотонов, которые мы далее будем считать комптоновскими. Однако при большем темпе счёта фоновыми фотонами становятся и фотоны, случайно зарегистрированные в двух соседних детекторах в течение промежутка времени, сравнимого с точностью измерения момента регистрации фотона детектором. Точность времени регистрации зависит от реализации — на аппаратном уровне или же на уровне обработки оцифрованного сигнала; но в любом случае оно не может быть меньше, чем мёртвое время детектора, в первом случае, и мёртвое время всего тракта обработки сигнала, как правило, времени дискретизации АЦП. Ниже мы исследуем зависимость фонового сигнала в комптоновской моде регистрации от интенсивности потока падающих фотонов в упрощённой модели регистрации комптоновских фотонов. Для простоты мы будем обозначать интервал времени регистрации, при котором мы считаем зарегистрированный фотон комптоновским как мёртвое время.

ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ГАММА-ДИАПАЗОНЕ

Эффект Комптона — упругое рассеяние фотона на свободном электроне. В случае, если налетающий фотон поляризован, рассеянный фотон не будет изотропным по отношению к азимутальному углу. Для линейно поляризованного фотона дифференциальное сечение комптоновского рассеяния даётся формулой Клейна — Нишины (Klein et al., 1929):

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \cdot r_e^2 \cdot \frac{E_{\gamma'}^2}{E_{\gamma}^2} \left(\frac{E_{\gamma'}}{E_{\gamma}} + \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma'}} - 2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \varphi \right).$$

Из этой формулы следует, что комптоновское рассеяние преимущественно происходит перпендикулярно вектору электрического поля \mathbf{E} , т.е. при $\varphi = 90^\circ$ (рис. 1, 2).

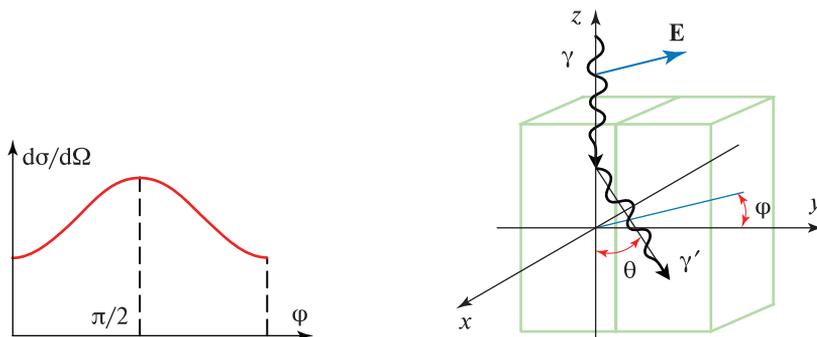


Рис. 1. Зависимость сечения рассеяния от азимутального угла

Рис. 2. Иллюстрация принципа работы комптоновского поляриметра

Рассмотрим принцип работы комптоновских поляриметров на примере детектора POLAR. Он состоит из множества стержней, представляющих собой пластиковые сцинтилляторы. Как видно на рис. 2, падающий фотон испытывает комптоновское рассеяние в одном из стержней и попадает в другой стержень. Используя геометрию положений двух стержней детектора, можно оценить угол комптоновского рассеяния φ , откуда можно сделать вывод о поляризации (Kole et al., 2021).

ВЛИЯНИЕ МЁРТВОГО ВРЕМЕНИ НА ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА

Мёртвое время — время, в течение которого счётчик не способен зарегистрировать новый фотон после регистрации предыдущего. Стоит отметить, что оно бывает двух типов: непродлевающее, которое не зависит от поступления новых фотонов, и продлевающее, которое возникает после каждого поступившего фотона, вне зависимости от того, происходит регистрация или нет. Оно наиболее заметно проявляется при высоких интенсивностях. В таких случаях мёртвое время оказывает существенное влияние на темп регистрации. Но потери счёта можно компенсировать введением поправки на это мёртвое время, т. е. можно восстановить истинный темп счета по измеряемым темпам регистрации (рис. 3). Связь загрузки на входе N и темпа регистрации N' выражается формулой:

$$N' = \frac{N}{1 + N\tau},$$

где τ — мёртвое время.

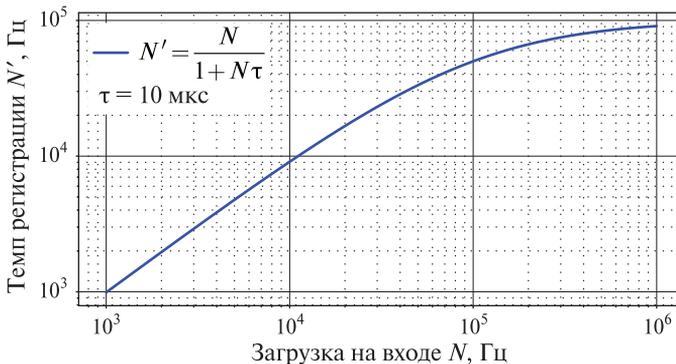


Рис. 3. Зависимость темпа регистрации от загрузки на входе при $\tau = 10$ мкс

ВЛИЯНИЕ МЁРТВОГО ВРЕМЕНИ НА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Эффект мёртвого времени, влияющий на измерение поляризации

Эффект одновременной регистрации фотонов в соседних стержнях (рис. 4а) может быть интерпретирован как комптоновское рассеяние налетающего фотона (рис. 4б). Фотоны считаются одновременно зарегистрированными, если интервал между регистрациями не превышает мёртвое время. Для измерения поляризации необходимо учитывать регистрацию только комптоновских фотонов, а одновременно пришедшие фотоны будут искажать истинный результат.

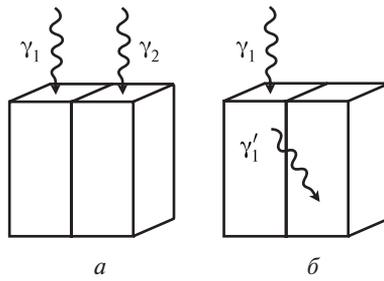


Рис. 4. Эффекты больших нагрузок, влияющие на регистрацию комптоновских фотонов

Постановка задачи с регистрацией комптоновских и фотопоглощенных фотонов с разными квантовыми эффективностями процессов

Налетающий фотон, попадая в 1-й стержень, испытывает комптоновское рассеяние. Затем этот комптоновский фотон попадает во 2-й стержень и фотопоглощается (однако возможно и повторное рассеяние). Причём квантовые эффективности этих процессов комптоновского рассеяния и фотопоглощения отличны от 100 %. Другими словами, часть фотонов, попадая в стержень, комптоновски рассеивается и впоследствии некоторая часть из них фотопоглощается при попадании в другой стержень. Таким образом, в каждом стержне регистрируются не только фотоны, которые комптоновски рассеются в этом стержне, но и фотоны, которые фотопоглощаются в данном стержне в течение интервала времени сравнения; очевидно, последние будут выглядеть как комптоновские, не являясь таковыми, и будут составлять фон.

Решение задачи с регистрацией комптоновских и фотопоглощённых фотонов с разными квантовыми эффективностями процессов

Учитывая, что интервал времени между приходами фотонов имеет экспоненциальное распределение, вероятность прихода фотонов с интервалом Δt , меньшим мёртвого времени τ :

$$P(\Delta t \leq \tau) = 1 - e^{-N\tau}, \quad (1)$$

где N — средний темп счёта. Вероятность, определяемая формулой (1), равна отношению количества одновременно зарегистрированных фотонов и количества налетающих фотонов. Если количество падающих фотонов $N\tau$, то количество одновременно зарегистрированных фотонов:

$$n_{\text{одн}} = N\xi_1\tau(1 - e^{-N\xi_1\tau}). \quad (2)$$

С учётом КПД регистрации в формуле (2) вместо N следует подставить $N\xi_1$, где ξ_1 — КПД регистрации комптоновского фотона, тогда

$$n_{\text{комп}} = N\xi_1\xi_2\tau, \quad n_{\text{одн}} = N\xi_1\tau(1 - e^{-N\xi_1\tau}).$$

Количество фотопоглощённых фотонов, которые были комптоновскими, равно

$$n_{\text{комп}} = N\xi_1\xi_2\tau,$$

где ξ_2 — КПД регистрации фотопоглощённого фотона. Отношение количества комптоновских фотонов и количества одновременно зарегистрированных равно

$$\frac{n_{\text{комп.}}}{n_{\text{одн}}} = \frac{\xi_2}{1 - e^{-N\xi_1\tau}}$$

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные зависимости показывают, что в нашей упрощённой модели для мёртвого времени порядка 10 мкс ошибка 10 % (рис. 5) достигается уже при умеренном темпе счёта $5 \cdot 10^3$ отсчётов в секунду на индивидуальный стержень. Из этого следует, что необходимо уменьшение размера индивидуального стержня сегментированного детектора и использования аппаратного сравнения времени регистрации фотонов, которое меньше, чем характерное мёртвое время сборки сцинтиллятор + АЦП. Интересным оказывается сравнение влияния мёртвого времени на регистрацию полного потока падающих фотонов на детектор и регистрацию комптоновских фотонов. В обоих случаях это влияние описывается экспоненциальной зависимостью. Но если в случае измерения потока возможно восстановление истинного полного потока (см., например, (Дзюба и др., 2020; Byrne et al., 2013; Gjesteland et al., 2012; Grefenstette et al., 2009; Tierney et al., 2013)), то в случае измерения поляризации восстановление истинной поляризации невозможно.

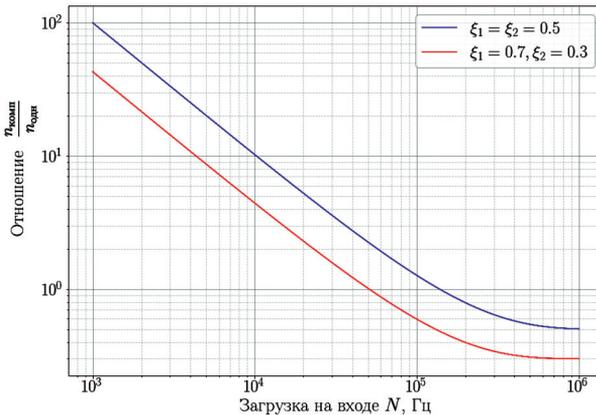


Рис. 5. Зависимость отношения количества комптоновских и одновременно зарегистрированных фотопоглощённых фотонов от загрузки на входе при $\tau = 10$ мкс

ЛИТЕРАТУРА

- Дзюба Е. С., Позаненко А. С., Минаев П. Ю., Выборнов В. И. Исследование гамма-вспышек земного происхождения, зарегистрированных экспериментом GBM космической обсерватории Fermi // 17-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 21–44. DOI: 10.21046/KMU-2020-21-44.
- Byrne D., Briggs M. S., Tierney D., Fitzpatrick G., Foley S., McBreen S. A Statistical Dead-Time Deconvolution Method for Fermi/GBM TGF Observations // EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU General Assembly Conf. Abstr. 2013. V. 15. Art. No. 4331.

- Chauvin M., Roques J. P., Clark D. J., Jourdain E.* Polarimetry in the hard X-ray domain with INTEGRAL SPI // arxiv.org/abs. 2018. 8 p. <https://arxiv.org/abs/1305.0802>.
- Gjesteland T., Østgaard N., Collier A. B., Carlson B. E., Eyles C., Smith D. M.* A new method reveals more TGFs in the RHESSI data // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. Art. No. L05. 102 p.
- Grefenstette B. W., Smith D. M., Hazelton B. J., Lopez L. I.* First RHESSI terrestrial gamma ray flash catalog // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. Iss. A2. Art. No. A02314. 19 p. <https://doi.org/10.1029/2008JA013721>.
- Klein O., Nishina Y.* Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quanten Dynamik von Dirac // Zeitschrift für Physik. 1929. V. 52. Iss. 11–12. P. 853–868.
- Kole M., de Angelis N., Burgess J. M., Cadoux F., Greiner J., Hulsman J., Li H. C., Mianowski S., Pollo A., Prodi N., Rybka D., Stauffer J., Sun J. C., Wu B. B., Wu X., Zadrozny A., Zhang S. N.* Gamma-Ray Polarization Results of the POLAR Mission and Future Prospects // 37th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2021). 12–23 July, Berlin, Germany. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.02977>.
- Strong A., Collmar W.* COMPTEL Reloaded: a heritage project in MeV astronomy. 2019. <https://arxiv.org/abs/1907.07454>.
- Tierney D., Briggs M. S., Fitzpatrick G., Chaplin V. L., Foley S., McBreen S., Connaughton V., Xiong S., Byrne D., Carr M., Bhat P. N., Fishman G. J., Greiner J., Kippen R. M., Meegan C. A., Paciesas W. S., Preece R. D., Kienlin A., Wilson-Hodge C.* Fluence distribution of terrestrial gamma ray flashes observed by the Fermi Gamma-ray Burst Monitor // J. Geophysical Research: Space Physics. 2013. V. 118. Iss. 10. P. 6644–6650.
- Xiao H., Hajdas W., Marcinkowski R.* A fully autonomous data center for the space-borne hard X-ray Compton polarimeter POLAR developed at PSI // arxiv.org/abs. 2019. 17 p. <https://arxiv.org/abs/1707.02071v2>.
- Yonetoku D., Murakami T., Gunji S., Mihara T., Sakashita T., Morihara Y., Kikuchi Y., Fujimoto H., Toukairin N., Kodama Y., Kubo S.* IKAROS Demonstration Team. Gamma-Ray Burst Polarimeter – GAP – aboard the Small Solar Power Sail Demonstrator IKAROS // arxiv.org/abs. 2010. 23 p. <https://arxiv.org/abs/1010.5305>.

THE EFFECT OF DEAD TIME ON THE MEASUREMENT OF LINEAR POLARIZATION IN COMPTON DETECTORS

A. A. Mkrтчyan¹, A. S. Pozanenko², P. Yu. Minaev²

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

² Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

The effects of dead time on measurements of linear polarization in the gamma range by Compton detectors is discussed. The dead time of the detector affects the rate and statistics of registration and, as a result, the accuracy of measuring the degree of linear polarization. For a simplified model of a segmented Compton detector, the influence of dead time on the polarization measurement is considered. Estimating the effect of dead time is relevant for measuring powerful transient events such as cosmic gamma-ray bursts (GRB) and terrestrial gamma-ray flares (TGF).

Keywords: dead time, gamma-ray bursts (GRB), terrestrial gamma-ray flares (TGF), linear polarization, Compton polarimeter

Mkrтчyan Arkady Ashotovich — student, mkr.aa@phystech.edu

Pozanenko Alexey Stepanovich — candidate of physical and mathematical sciences

Minaev Pavel Yurievich — candidate of physical and mathematical sciences

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС И ХАРАКТЕРНЫХ РАЗМЕРОВ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

А. Н. Нежин^{1,2}, Н. С. Лыскова², И. И. Хабибуллин^{3,2,4}

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия

² Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

³ Мюнхенский университет имени Людвига и Максимилиана, Мюнхен, Германия

⁴ Институт астрофизики Общества Макса Планка, Гархинг, Германия

В настоящей работе описывается теория и практика моделирования процессов самоподобной аккреции вещества в сферически симметричных структурах, а также на примере модельных данных Gaia Challenge рассматриваются методы определения масс скоплений галактик по наблюдаемым параметрам. В конце статьи обсуждается возможность дальнейшего совместного применения полученных моделей для быстрого получения большого количества данных, которые могут быть использованы в качестве первых приближений для более сложных моделей.

Ключевые слова: скопление галактик, самоподобная модель, аккреция, определение массы, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Рост наиболее массивных объектов во Вселенной — скоплений галактик — происходит в результате поглощения индивидуальных объектов меньшей массы, а также непрерывной аккреции тёмной материи и газа межгалактической среды. Космологическая эволюция данного процесса чувствительна к динамике расширения Вселенной, что делает анализ наиболее массивных скоплений мощным инструментом для изучения, в частности, роли тёмной энергии и характеристик тёмной материи.

С наблюдательной точки зрения, принципиальным моментом представляется максимально точное измерение масс скоплений, позволяющее напрямую использовать теоретические предсказания для определения космологических параметров. Такие измерения невозможны без качественного определения характерных размеров скопления галактик. Таким образом, работа состоит из двух частей: моделирование положения аккреционной ударной волны и определение массы системы.

В первой части описывается моделирование самоподобной аккреции вещества на скопление галактик в модели Вселенной Эйнштейна–де Ситтера (Einstein, de Sitter, 1932). Рассматриваются основные положения теории самоподобного процесса и особенности решения задачи, затем приводятся результаты численного моделирования при различных начальных параметрах: положения ударной волны, распределения давления и плотности газа, скорости и массы газа и тёмной материи.

Во второй части рассматриваются различные методы определения динамических масс скоплений галактик. В частности, демонстрируется применение теоремы вириала и сферического уравнения Джинса на модельных системах.

Нежин Александр Николаевич — старший лаборант, студент, nezhin.an@phystech.edu

Лыскова Наталья Сергеевна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, natalya.lyskova@gmail.com

Хабибуллин Ильдар Инзилович — научный сотрудник (LMU), старший научный сотрудник (ИКИ), кандидат физико-математических наук, khabibullin@iki.rssi.ru

САМОПОДОБНАЯ АККРЕЦИЯ ВЕЩЕСТВА В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК

Физика процесса

Моделирование самоподобной аккреции производится в приближении модели Вселенной Эйнштейна – де Ситтера, которая хорошо выполняется на красных смещениях от $z \sim 300$ до $z \sim 2$. Таким образом, полагается, что доминирующей силой становится гравитация, релятивистские частицы отсутствуют, а сама Вселенная становится плоской.

В такой модели справедлив невозмущённый закон Хаббла:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\vec{r}}{t}. \quad (1)$$

А средняя плотность Вселенной задаётся как:

$$\rho_H(t) = \frac{1}{6\pi G t^2}. \quad (2)$$

Соответственно, рассматривается ситуация, когда до какого-то момента времени t_f в исследуемой области пространства плотность вещества (как барионного, так и тёмной материи) равнялась средней плотности (2), а само вещество было распределено однородно. В момент времени t_f формируется сгусток (возмущение) с массой δM_i , а остальное вещество, массой M_i , в силу возникшего возмущения плотности начинает замедлять своё расширение во Вселенной (рис. 1).

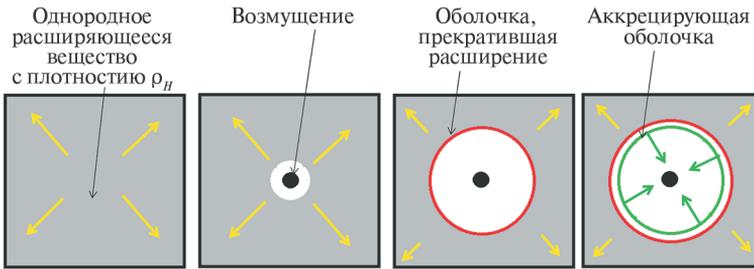


Рис. 1. Процесс начала аккреции на возмущение. Серый цвет — однородное расширяющееся вещество с плотностью ρ_H ; чёрный — возмущение; красная окружность — оболочка, прекратившая расширение; зелёная — аккрецирующая оболочка; жёлтые стрелки — указание на расширение материи; зелёные — указание на аккрецию вещества

Тогда для каждого выделенного слоя вещества существуют момент времени t^* и расстояние r^* такие, что его расширение по Вселенной останавливается и он начинает аккрецировать на возмущение δM_i — происходит «разворот» движения. При этом текущий радиус разворота обозначается r_{ia} (рис. 2), а текущее положение выделенной оболочки с r^* обозначается r .

При этом, так как самоподобие системы требует отсутствия выделенных масштабов, масса возмущения может быть связана с изначальной массой вещества только по степенному закону:

$$\frac{\delta M_i}{M_i} = \left(\frac{M_i}{M_0} \right)^{-1/s}, \quad (3)$$

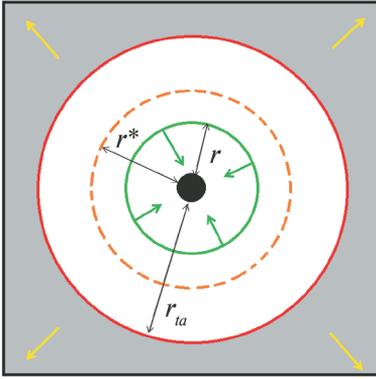


Рис. 2. Цветовые обозначения аналогичны рис. 1. Рыжая прерывистая окружность — положение радиуса разворота для конкретной рассматриваемой оболочки. Буквенные обозначения указаны в тексте

где M_0 — масштабирующий множитель, а сам размер возмущения полагается пренебрежимо малым.

Так как в рассматриваемой модели основная сила — гравитационная, то для сферической оболочки газа справедливо уравнение движения:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{Gm}{r^2} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}. \tag{4}$$

Уравнение движения холодной тёмной материи будет иметь аналогичный вид, но без силы давления в правой части.

Введём замену переменных (Bertsinger, 1985b):

$$\begin{cases} \lambda = \frac{r}{r_{ta}(t)}, \\ \xi = \ln\left(\frac{t}{t^*}\right), \end{cases} \tag{5}$$

и определим безразмерные скорость (V), плотность (D), давление (P) и массу (M):

$$\begin{cases} v = \frac{r_{ta}}{t} V(\lambda), \\ \rho = \rho_H D(\lambda), \\ p = \rho_H \left(\frac{r_{ta}}{t}\right)^2 P(\lambda), \\ m = \frac{4\pi\rho_H}{3} r_{ta}^3 M(\lambda). \end{cases} \tag{6}$$

Подставим выражения (6) и (5) в формулу (4) и учтём рассуждения авторов публикации (Fillmore and Goldreich, 1984):

$$\begin{cases} r_{ta} \propto t^\delta, \\ \delta = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{s}{3}\right). \end{cases} \tag{7}$$

Тогда получим безразмерное уравнение движения:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \lambda}{d\xi^2} + (2\delta - 1) \frac{d\lambda}{d\xi} + \delta(\delta - 1)\lambda = -\frac{2}{9} \cdot \frac{M(\lambda)}{\lambda^2} - \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial P}{\partial \lambda}, \\ \lambda \Big|_{\xi=0} = 1, \\ \frac{d\lambda}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = -\delta, \end{cases} \tag{8}$$

в котором начальные условия очевидным образом следуют из определения переменных λ и ξ .

Важной особенностью уравнения (8) представляется его трансляционная симметрия: *если $\lambda(\xi)$ — решение, то и $\lambda(\xi + a)$ — решение*. Этот факт избавляет от необходимости выполнять подробные нестационарные вычисления с большим количеством сферических оболочек, поскольку однократного интегрирования уравнения (8) с указанными начальными условиями достаточно, чтобы получить решение для всех оболочек, прошедших «разворот». Это общая особенность самоподобных решений: *все траектории частиц выглядят одинаково при соответствующем масштабировании во времени* (Bertschinger, 1985b).

Как можно видеть, в систему (8) входит зависимость $M(\lambda)$, которая различна для бесстолкновительной тёмной материи и столкновительного холодного межгалактического газа. Соответственно, для них необходимо раздельное рассмотрение.

Бесстолкновительная тёмная материя

Тёмная материя, т.е. бесстолкновительное вещество, не испытывает прохождения ударного фронта. Но возникает особенность иного характера: после достижения центра системы оболочка не останавливается, а в силу бесстолкновительности начинает расширяться, пока не достигнет «возвратного» радиуса, где вновь начнёт своё падение на возмущение.

Автор работы (Bertschinger, 1985a) подробно вывел искомую зависимость $M(\lambda)$ для бесстолкновительных самоподобных оболочек, которая имеет вид:

$$M(\lambda) = M_{ta} \sum_i (-1)^{i-1} \exp\left[-\frac{2s}{3} \xi_i\right]. \quad (9)$$

Столкновительный газ

Случай столкновительного межгалактического газа существенно проще, чем случай бесстолкновительной тёмной материи, так как нет пересечений падающих оболочек. Поскольку типичная температура межгалактического газа на несколько порядков ниже, чем у газа внутри скоплений, то можно пренебречь давлением, прежде чем газ пройдёт аккреционную ударную волну. С этим предположением о холодной аккреции тёмная и барионная материя динамически неотличимы до ударной волны, т.е. их поведение одинаково задаётся решением уравнения (8). Но последующее движение сферических оболочек газа требует учёта возникшего после волнового фронта давления, что возможно сделать, используя уравнения гидродинамики, которые имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dt} = -\frac{\rho}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r^2 v), \\ \frac{dv}{dt} = -\frac{Gm}{r^2} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}, \\ \frac{d}{dt}(p\rho^{-\gamma}) = 0, \\ \frac{\partial m_{gas}}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho. \end{array} \right. \quad (10)$$

В безразмерных координатах уравнение Эйлера, движения, состояния и массы имеют вид соответственно (Bertschinger, 1983; Shi, 2016):

$$\left\{ \begin{aligned} (V - \delta\lambda) \frac{\partial D}{\partial \lambda} + D \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{2DV}{\lambda} - 2D &= 0, \\ (V - \delta\lambda) \frac{\partial V}{\partial \lambda} + (\delta - 1)V &= -\frac{2}{9} \cdot \frac{M(\lambda)}{\lambda^2} - \frac{\partial P}{\partial \lambda} \cdot \frac{1}{D}, \\ (V - \delta\lambda) \left(\frac{\partial P}{\partial \lambda} \cdot \frac{1}{P} - \gamma \frac{\partial D}{\partial \lambda} \cdot \frac{1}{D} \right) &= -2(\gamma - 1) - 2(\delta - 1), \\ \frac{\partial M_{gas}}{\partial \lambda} &= 3\lambda^2 D. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Полагая ударный фронт адиабатическим (Bertshinger, 1983), а параметры газа в центре системы $V(0) = 0$, $M_{gas}(0) = 0$, можно получить соответствующие граничные условия, которые замыкают системы уравнений (8) и (11).

Таким образом, получены все необходимые выражения для моделирования траекторий и профилей массы, скорости, давления, концентрации тёмной материи и межгалактического газа.

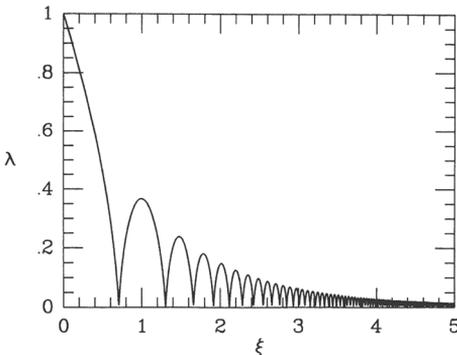
Особенности моделирования

Процесс моделирования требует определённой модификации систем уравнений (8) и (11), чтобы избежать, например, расходимости вычислений при экспоненциальном возрастании и убывании параметров, «подкачки энергии» или ошибок в численном методе из-за скачков производных.

Соответственно, большая часть изменений систем уравнений заключается в замене переменных с учётом асимптотик, что не меняет физического смысла оных. Но для того, чтобы обойти ошибки в методе Рунге–Кутты (Dormand, Prince, 1980; Verner, 2010) из-за скачков производной $\partial\lambda/\partial\xi$ (рис. 3) при переходе оболочки через центр системы, замена переменных не подходит.

В настоящей работе для решения этой проблемы используется подход, предложенный автором труда (Bertshinger, 1985b) по данной тематике. Предполагается, что каждое кольцо сферической оболочки с центром в нуле системы имеет изначальный малый момент импульса \mathcal{L} . Тогда в уравнение движения (4) входит малая поправка вида:

$$\frac{\partial^2 r_{rot}}{\partial t^2} = \frac{\mathcal{L}^2}{M^2 r^3} \quad (12)$$



При правильном подборе параметра \mathcal{L} на больших расстояниях от центра системы влияние поправки пренебрежимо мало, а при $\lambda \sim 0$ возникает существенная отталкивающая сила, которая будет искусственно «разворачивать» траекторию оболочки.

Рис. 3. Самоподобная траектория $\lambda(\xi)$ для бесстолкновительной материи, $s = 1$ (Bertschinger, 1985b)

Моделирование и результаты

Процесс моделирования состоит из трёх этапов:

1. Решение чисто бесстолкновительного случая без учёта барионной материи.
2. Поиск профилей газа при условии $\Omega_b \ll \Omega_m$.
3. Итерационное повторение этапов 1–2 при $\Omega_b/\Omega_m = 0,15$.

При этом этапы 1 и 2 также итерационны, а их подробное описание приведено в приложении.

Полученные в результате моделирования для темпа аккреции $s = 1$ зависимости $\lambda(\xi)$ и $M(\lambda)$ для бесстолкновительной тёмной материи и основные профили для столкновительного газа при $\gamma = 5/3$ приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

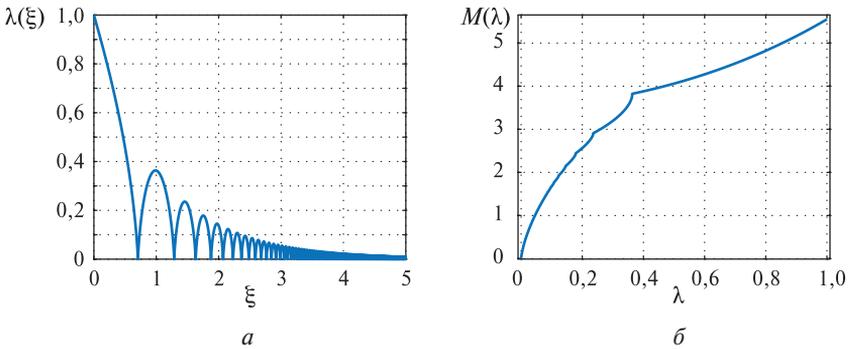


Рис. 4. Траектория бесстолкновительной тёмной материи $\lambda(\xi)$ (а); профиль массы бесстолкновительной тёмной материи $M(\lambda)$ (б). Оба рисунка соответствуют темпу аккреции $s = 1$

Положение ударной волны: $\lambda_{shock} = 0,34686$

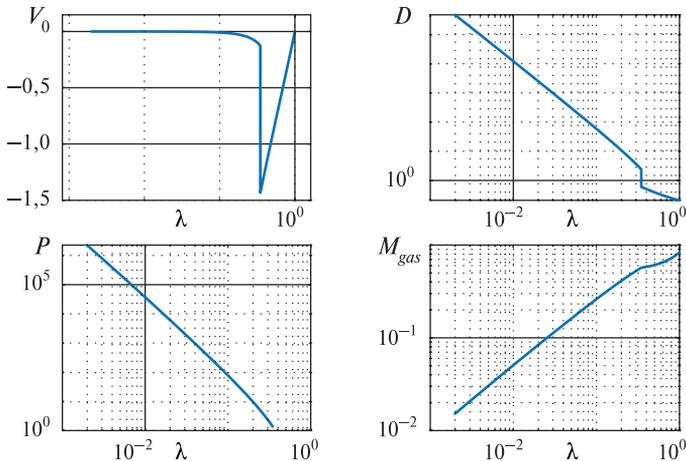


Рис. 5. Профили безразмерных скорости (V), концентрации (D), давления (P) и массы (M_{gas}) для столкновительного газа на примере случая с темпом аккреции $s = 1$ и показателем адиабаты $\gamma = 5/3$. При этом некоторые характеристики не стремятся к нулю в логарифмическом масштабе, так как имеющиеся данные — поточечные

Значения λ_{sh} при различных s и γ , полученные в данной работе (слева) и в труде (Shi, 2016) (справа)

s	γ				s	γ			
	3	2	5/3	3/2		3	2	5/3	3/2
0,5	0,6500	0,5109	0,4056	0,3293	0,5	0,650	0,501	0,405	0,329
1,0	0,5896	0,4365	0,3469	0,2789	1,0	0,590	0,437	0,347	0,279
2,0	0,4824	0,3316	0,2559	0,2017	2,0	0,482	0,332	0,256	0,202
3,0	0,3945	0,2558	0,1933	0,1503	3,0	0,394	0,256	0,193	0,150

Полученные для различных темпов аккреции s и показателей адиабаты γ положения аккреционной ударной волны λ_{sh} указаны в таблице слева, а справа приведены аналогичные величины из работы (Shi, 2016). Как можно видеть, результаты моделирования, приведённые в данной статье, совпадают с результатами других учёных.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МАСС СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Общая теория

В настоящей работе рассматриваются следствия из двух общеизвестных уравнений:

- 1) скалярная теорема вириала,
- 2) сферическое уравнение Джинса.

Скалярная теорема вириала имеет вид (Binney, Tremaine, 1994):

$$\begin{cases} 2K + W = 0, \\ K = M \frac{v^2}{2}, \\ W = \frac{GM^2}{r_g}. \end{cases} \quad (13)$$

Если система сферическая, а наблюдение проводится по оси Oz , то среднее от квадрата скорости можно переписать через усреднённую по светимости дисперсию лучевых скоростей:

$$v^2 = \frac{6K_{zz}}{M} = 3 \frac{\int d^3r \rho(r) v^2}{\int d^3r \rho(r)} = 3 \frac{\int \sigma_{\parallel}^2 I(R) R dR}{\int I(R) R dR} = 3 \langle \sigma_{\parallel}^2 \rangle. \quad (14)$$

Тогда из выражения (13) с учётом равенства (14):

$$M = 3 \frac{\langle \sigma_{\parallel}^2 \rangle r_g}{G}. \quad (15)$$

Гравитационный радиус r_g — не наблюдаемая величина, но для соотношения масса — светимость порядка единицы справедливо (Лыскова, 2015):

$$\frac{r_{1/2}}{r_g} \approx 0,4 \text{ и } \frac{r_{1/2}}{R_{1/2}} \approx 1,3. \quad (16)$$

Таким образом выражение (15) принимает вид:

$$M \approx 9,8 \frac{\sigma_{\parallel}^2 R_{1/2}}{G}. \quad (17)$$

Полученное выражение (17) позволяет определить массу скопления только по наблюдаемым данным, а именно по усреднённой светимости дисперсии лучевых скоростей и радиусу половинной поверхностной светимости.

Сферическое уравнение Джинса имеет вид (Binney, Tremaine, 1994):

$$\begin{cases} \frac{d(n\sigma_r^2)}{dr} + 2\frac{\beta(r)}{r}n\sigma_r^2 = -n\frac{d\Phi}{dr}, \\ \beta(r) = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma_t^2}, \end{cases} \quad (18)$$

где n — концентрация вещества; β — показатель анизотропии; σ_r^2 и σ_t^2 — дисперсия радиальных и тангенциальных скоростей соответственно, Φ — гравитационный потенциал.

В анизотропном случае ($\beta = 0$), используя уравнение инверсии Абеля, можно получить уравнение на профиль массы скопления через наблюдаемые величины (Mamon, Boué, 2010):

$$\begin{cases} M(< r) = \frac{r}{\pi G j(r)} \int_r^{+\infty} \frac{d^2(I \sigma_{\parallel}^2)}{dR^2} \cdot \frac{R dR}{\sqrt{R^2 - r^2}}, \\ j(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{+\infty} \frac{dI}{dR} \cdot \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}}. \end{cases} \quad (19)$$

Применение к данным Gaia Challenge

Полученные выше уравнения (17) и (19) применяются к данным космического телескопа Gaia (*англ.* Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) проекта Gaia Challenge (Walker, Penarrubia, 2011). Этот проект заключается в создании и распространении различных моделей галактик, полученных, в том числе, путём моделирования N-тел. Преимущество использования модельных данных такого рода в данной работе в том, что легко можно проанализировать те или иные особенности методов, которые планируется применять к реальным скоплениям, так как известен точный ответ. При этом стоит отметить: несмотря на то, что проект Gaia Challenge занимается моделированием галактик, полученные результаты также применимы и к скоплениям — при рассмотрении сферически симметричных систем разница будет только по порядку получаемых величин, но не по качественным результатам.

Таким образом, в данной работе рассматриваются два случая:

- 1) изотропный — $\beta = 0$,
- 2) анизотропный — $\beta = \frac{r^2}{r^2 + r_a^2}$, где r_a — радиус анизотропии.

В первом случае (рис. 6а) результаты применения формул (17) и (19) к наблюдаемым данным (звёздочка и сплошная линия соответственно) хорошо совпадают с теоретическим профилем распределения массы (пунктирная линия).

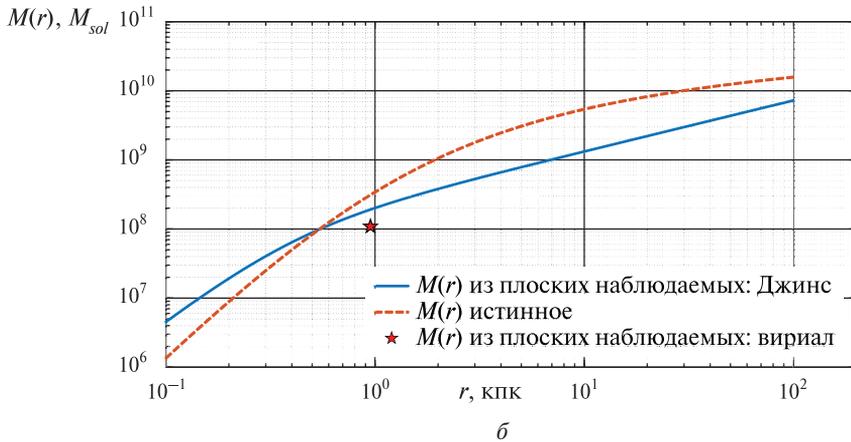
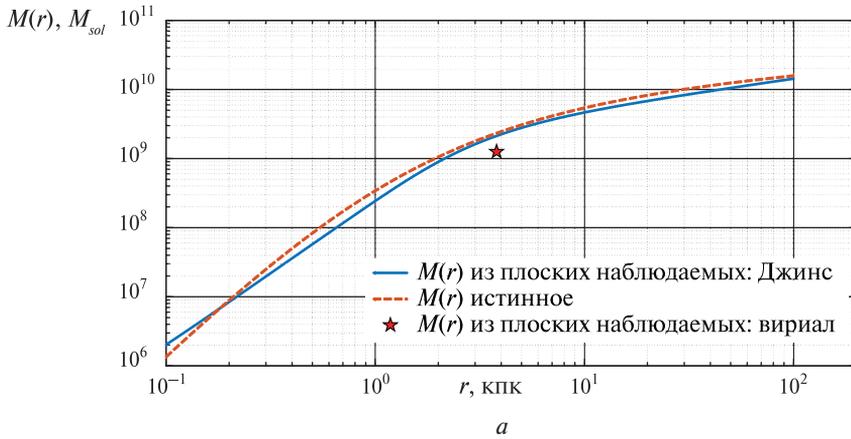


Рис. 6. Сопоставление полученных значений массы по следствиям из уравнения Джинса и теоремы вириала с теоретическим профилем массы модельной галактики: *a* — для изотропного случая; *б* — для анизотропного случая

При этом наибольший вклад в ошибку вносит способ разбиения пространства на отрезки, что существенно сказывается на применении следствия из теоремы вириала.

Во втором случае (рис. 6б) явно видно (обозначения аналогичны предыдущему рисунку), что результаты, следующие из уравнения Джинса в приближении изотропного случая, совершенно не совпадают с истинным профилем массы. Но существует точка пересечения этих двух кривых, вблизи которой также лежит и значение массы полученное из теоремы вириала. Как показывается в работах (Churazov, 2010; Wolf, 2010), такое совпадение не случайно: расстояние, на котором пересекаются истинный и экспериментальный профиль, примерно соответствует эффективному радиусу светимости $R_{1/2}$.

Соответственно, применение уравнения (19) к анизотропному случаю может давать неправильный профиль массы в целом, но в определённых точках

результат будет близок к истинному. И для помощи в определении области применимости следствия из уравнения Джинса как раз может применяться оценка, получаемая по выражению (17).

Таким образом, на примере модельных данных Gaia Challenge продемонстрирована возможность определения массы скопления галактик при помощи только наблюдательных данных. Причём описанные выражения не требуют каких-либо существенных вычислительных мощностей.

ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Описанные в первой и второй части работы методы представляются, в первую очередь, не требовательными к вычислительным мощностям. К тому же использование описанных приёмов получения массы скопления галактик опирается исключительно на наблюдаемые данные и применимо к широкому классу профилей светимости.

Всё это наталкивает на мысль возможного совместного использования модели самоподобной аккреции и способов определения масс скоплений для получения без продолжительных вычислений большого количества оценок параметров интересующего объекта, которые могут выступать в качестве первого приближения для более сложных моделей.

Определив при помощи следствий из уравнения Джинса и теоремы вириала массу скопления, а также гравитационный радиус, можно сопоставить их с массой скопления внутри радиуса первого «разворота» тёмной материи и самим радиусом «разворота» соответственно. Тем самым определяется темп аккреции и масштабирующий фактор, а значит все прочие результаты моделирования самоподобной аккреции вещества будут определены и отмасштабированы под интересующее скопление.

В данный момент активно ведётся разработка этого метода. Результаты работы представлены в дипломе на соискание бакалаврской степени (Нежин и др., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы, во-первых, реализован способ моделирования самоподобной аккреции вещества с учётом барионной и небарионной материи. Во-вторых, описаны различные методы определения динамических масс скоплений галактик, а также продемонстрировано их применение на модельных данных Gaia Challenge.

Также описан возможный способ дальнейшего развития данной работы, заключающийся в совместном применении моделирования самоподобной аккреции и получения параметров системы по наблюдаемым данным. Ожидается, что в результате будет реализована модель, позволяющая «дешёвым» (с вычислительной точки зрения) способом получать большое количество данных, которые могут быть использованы в качестве первого приближения для более сложных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

Лыскова Н. С. Методы определения масс эллиптических галактик, применимые для больших обзоров: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2015. 136 с.

- Нежин А. Н., Лыскова Н. С., Хабибуллин И. И. Определение масс и характерных размеров скоплений галактик: дипломная работа на соискание бакалаврской степени. М., 2022.
- Bertschinger E. Cosmological self-similar shock waves and galaxy formation // *Astrophysical J.* 1983. V. 268. P. 17–29. DOI: 10.1086/160925.
- Bertschinger E. (1985a) The self-similar evolution of holes in an Einstein-de Sitter universe // *Astrophysical J.* 1985. V. 58. P. 1–37. DOI: 10.1086/191027.
- Bertschinger E. (1985b) Self-similar secondary infall and accretion in an Einstein-de Sitter universe // *Astrophysical J. Supplement Series.* 1985. V. 58. P. 39–65. DOI: 10.1086/191028.
- Binney J., Tremaine S. Galactic dynamics. 2nd ed. Princeton University Press, 1994. 733 p.
- Binney J., Merrifield M. Galactic Astronomy. Princeton University Press, 1998. 796 p.
- Churazov E., Tremaine S., Forman W., Gerhard O., Das P., Vikhlinin A., Jones C., Böhringer H., Gebhardt K. Comparison of approximately isothermal gravitational potentials of elliptical galaxies based on X-ray and optical data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2010. V. 404. Iss. 3. P. 1165–1185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16377.x>.
- Dormand J. R., Prince P. J. A family of embedded Runge-Kutta formulae // *J. Computational and Applied Mathematics.* 1980. V. 6. Iss. 1. P. 19–26.
- Einstein A., de Sitter W. On the relation between the expansion and the mean density of the universe // *Proc. National Academy of Sciences.* 1932. V. 18. Iss. 3. P. 213–214.
- Fillmore J. A., Goldreich P. Self-similar gravitational collapse in an expanding universe // *Astrophysical J.* 1984. V. 281. Pt. 1. P. 1–8. DOI: 10.1086/162070.
- Mamon G. A., Boué G. Kinematic deprojection and mass inversion of spherical systems of known velocity anisotropy // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2010. V. 401. Iss. 4. P. 2433–2450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15817.x>.
- Read J. I., Mamon G. A., Vasiliev E., Watkins L. L., Walker M. G., Peñarrubia J., Wilkinson M., Dehnen W., Das P. Breaking beta: a comparison of mass modelling methods for spherical systems // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2021. V. 501. Iss. 1. P. 978–993. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3663>.
- Shi X. Locations of accretion shocks around galaxy clusters and the ICM properties: insights from self-similar spherical collapse with arbitrary mass accretion rates // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2016. V. 461. Iss. 2. P. 1804–1815. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1418>.
- Verner J. Numerically optimal Runge-Kutta pairs with interpolants // *Numerical Algorithms.* 2010. V. 53. P. 383–396. <https://doi.org/10.1007/s11075-009-9290-3>.
- Walker M. G., Penarrubia J. A Method for Measuring (Slopes of) the Mass Profiles of Dwarf Spheroidal Galaxies // *Astrophysical J.* 2011. V. 742. No. 1. 20 p.
- Wolf J., Martinez G. D., Bullock J. S., Kaplinghat M., Geha M., Muñoz R. R., Simon J. D., Avdo F. F. Accurate masses for dispersion-supported galaxies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2010. V. 406. Iss. 2. P. 1220–1237. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16753.x.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Как было отмечено в основной части статьи, этапы моделирования 1 и 2 (решение чисто бесстолкновительного случая и поиск профилей параметров газа без учёта вклада в массу системы барионной материи) — итерационны, а их алгоритм удобно представить в виде блок-схем (рис. П1).

На этапе 1 изначально задаётся некий профиль массы $M(\lambda)$, на основе которого строится траектория оболочек $\lambda(\xi)$, после чего профиль массы уточняется. Процесс повторяется итерационно, пока относительное изменения траектории $\lambda(\xi)$ между этапами не станет менее заданной величины.

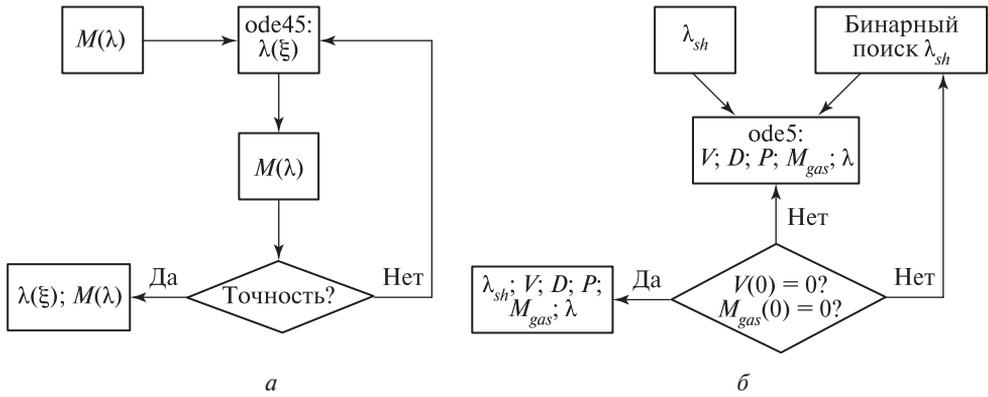


Рис. П1. Блок-схемы: а — этап 1 ; б — этап 2

На этапе 2 задаётся некое начальное положение ударного фронта λ_{sh} , после чего вычисляются профили характерных величин для столкновительного газа. Если граничные условия в центре системы с заданной точностью удовлетворяют теоретическим, то полученное значение λ_{sh} принимается, иначе при помощи бинарного поиска задаётся новое значение λ_{sh} , и проверка продолжается.

EVALUATION OF MASSES AND CHARACTERISTIC SIZES OF GALAXY CLUSTERS

A. N. Nezhin^{1,2}, N. S. Lyskova², I. I. Khabibullin^{3,2,4}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

² Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

³ Ludwig-Maximilians-Universität München, (LMU), Munich, Germany

⁴ Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA), Garching, Germany

In this paper the theory and practice of modeling the processes of self-similar accretion of matter in spherically symmetric structures are described, also, using the Gaia Challenge model data as an example, methods for determining the masses of galaxy clusters from the observed parameters are considered. At the end of the article, the possibility of further joint application of the obtained models for quick obtaining a large amount of data that can be used as priors for more complex models is discussed.

Keywords: galaxy cluster, self-similar model, accretion, mass evaluation, simulation

Nezhin Alexander Nikolaevich — senior laboratory assistant, student, nezhin.an@phystech.edu

Lyskova Natalya Sergeevna — researcher, candidate of physical and mathematical sciences, natalya.lyskova@gmail.com

Khabibullin Ildar Inzilovich — researcher (LMU), senior researcher (IKI), candidate of physical and mathematical sciences, khabibullin@iki.rssi.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКИ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Я. А. Нейштадт, М. Ю. Червяков

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия

Обсуждаются вопросы оценки климатических условий для решения задач солнечной энергетики на территории Саратовской области. Проведён сравнительный анализ наземных актинометрических данных Мирового радиационного центра Главной геофизической обсерватории и данных спутникового проекта CERES (NASA). На основе многолетних спутниковых данных для юго-востока европейской территории России исследована их сезонная и пространственная изменчивость. В результате проведённого анализа были раскрыты некоторые особенности поступления солнечной энергии. Выполнено районирование Саратовской области с использованием программы MapInfo на основе данных спутникового проекта CERES, что позволило дифференцировать территорию по особенностям радиационного режима. Сделан вывод о наиболее подходящей территории для расположения гелиоэнергетических станций.

Ключевые слова: гелиоэнергетика, суммарная солнечная радиация, CERES, климатический потенциал, солнечная энергия, солнечная радиация

Возобновляемые источники энергии — это действующие в окружающей среде источники энергии, использующие энергию природных процессов. К этим источникам относятся: энергия ветра, приливов и отливов, земных недр и Солнца. Солнечная энергетика в России существует только в виде небольших установок автономного энергоснабжения. Гелиоэнергетика должна ориентироваться в первую очередь на метеорологические и климатические условия, учитывая их особенности. К основным показателям, рассматриваемым при установке солнечных электростанций и панелей, относятся данные о временных и пространственных вариациях потоков солнечной радиации.

Современные глобальные и региональные изменения, происходящие в климатической системе, требуют оценки пространственно-временной изменчивости основных климатообразующих факторов и, в частности, радиационного баланса подстилающей поверхности. Измерение радиационного баланса входило в программу основных наблюдений сетевых актинометрических станций СССР, а в дальнейшем России. Плотность актинометрической сети изначально была недостаточна для освещения всех регионов. В настоящее время актинометрическая сеть Росгидромета уменьшилась и работает по трём программам наблюдений: непрерывные круглосуточные измерения пяти видов радиации, срочные наблюдения и измерения суточных сумм суммарной радиации. В последние десятилетия на многих станциях в связи с состоянием приборной базы прекратились наблюдения за радиационным балансом (Нейштадт, Червяков, 2020а, б, 2021; Червяков, 2020а, б; Червяков, Нейштадт, 2018).

Существенно дополняют наблюдения наземной сети спутниковые данные, но их усвоение и обработка могут представлять проблему для пользователей. Большие возможности оценки радиационных характеристик и их пространственной изменчивости открываются в связи с разработкой и предоставлением в открытом доступе базы данных NASA (*англ.* National Aeronautics and Space

Нейштадт Яков Андреевич — студент магистратуры, yasha.nejshadt@mail.ru

Червяков Максим Юрьевич — заведующий кафедрой метеорологии и климатологии, кандидат географических наук

Administration) POWER (*англ.* Prediction of Worldwide Energy Resource Project) Национального агентства по авиации и исследованию космического пространства США, адаптированной для расчётов солнечной энергии (Богданов и др., 2016; Скляр и др., 2012а, б; Neyshtadt, Chervyakov, 2020; Morozova et al., 2021а, б).

В базе данных NASA CERES (*англ.* Clouds and the Earth's Radiant Energy System) — Система изучения облачности и излучения Земли) приведены средние суточные и среднемесячные величины приходящей суммарной солнечной радиации у поверхности Земли с пространственным разрешением $1,0 \times 1,0^\circ$ с 2007 г.

Наиболее полные архивы данных актинометрических наблюдений сосредоточены в мировых радиационных центрах данных Всемирной метеорологической организации. Один из крупнейших центров расположен в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (ГГО). Данный центр аккумулирует актинометрическую информацию, которая включает характеристики потоков солнечной радиации на сети актинометрических станций Африки, Евразии, в том числе России. Ежегодно на сайте Мирового радиационного центра данных ГГО публикуется бюллетени, содержащие информацию о прямой и рассеянной солнечной радиации по станциям (Богданов, Червяков, 2019, 2022; Богданов и др., 2021, 2022; Невидимова, Янкович, 2015; Нейштадт и др., 2021; Скляр и др., 2013а–в).

В данной работе были использованы массивы измерений по станции Самара — единственной станции в Нижнем Поволжье, архив с которой опубликован в бюллетенях. Эти данные были использованы для анализа временной изменчивости составляющих радиационного баланса земной поверхности и сопоставления со спутниковыми данными проекта CERES. Также для репрезентативности спутниковых данных использовались массивы информации со станции Петропавловска-Камчатского. В работе проведено сравнение среднемесячных значений суммарной солнечной радиации по данным архива ГГО, представленных в базе данных Мирового радиационного центра и данным проекта CERES за период с 2007 по 2018 г.

Первоначально для наиболее оптимального анализа суммарной солнечной радиации по проекту CERES данные ГГО были приведены в единицы измерения проекта CERES — $\text{Вт}/\text{м}^2$.

На рис. 1 в качестве примера представлено сопоставление данных актинометрических измерений на станции Самара и спутниковых измерений проекта CERES. Видна хорошая согласованность рассматриваемых величин. Аналогичный график, изображённый на рис. 3, построен для Петропавловска-Камчатского. Анализ временных рядов потоков солнечной радиации для этого города проведён для дополнительной оценки наземных данных в климате, отличном от Саратовской области.

Для привязки значений проекта CERES к данным актинометрических станций были построены корреляционные диаграммы для Самары и Петропавловска-Камчатского, представленные на рис. 2 и 4. Выведены уравнения взаимосвязи данных рядов по суммарной солнечной радиации по актинометрическим станциям и спутниковым измерениям. Это позволило сделать вывод, что данные актинометрических станций хорошо восстанавливаются по спутниковой информации.

Также была проведена процедура оценки корреляционной зависимости между рядами наземных данных со спутниковыми. Для Самары коэффициент корреляции составил 0,99, а для Петропавловска-Камчатского — 0,98.

Проведённые сравнения позволили сделать вывод о пригодности спутниковых данных проекта CERES для оценки изменчивости суммарной радиации для любой географической точки в пределах наблюдаемости спутниковых радиометров.



Рис. 1. Временной ход суммарной солнечной радиации у поверхности Земли в Самаре по данным актинометрических станций и спутниковых измерений NASA (Aqua) за период 2012–2017 гг.

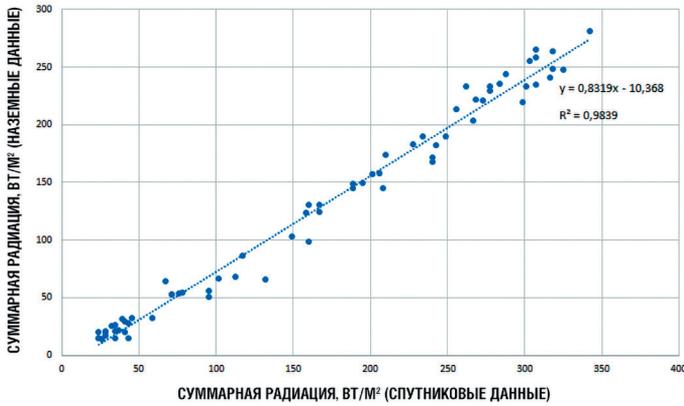


Рис. 2. Корреляционная диаграмма по данным актинометрических станций и спутниковых измерений NASA (Aqua) за период 2012–2017 гг. в Самаре



Рис. 3. Временной ход суммарной солнечной радиации у поверхности Земли в Петропавловске-Камчатском по данным актинометрических станций и спутниковых измерений NASA (Aqua) за период 2012–2017.

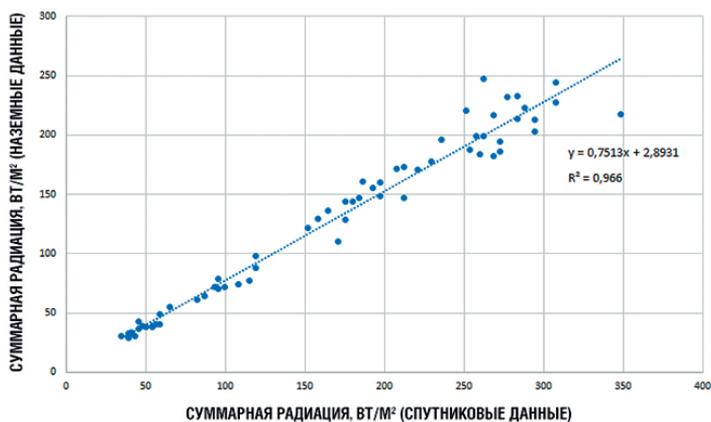


Рис. 4. Корреляционная диаграмма по данным актинометрических станций и спутниковых измерений NASA (Aqua) за период 2012–2017 гг. в Петропавловске-Камчатском

Для подробного анализа приходящей на территорию Саратовской области солнечной радиации были построены карты многолетних средних значений суммарной солнечной радиации по данным проекта NASA CERES с 2007 по 2019 г.

Для этого был выбран весь период измерений прибора CERES, а именно с 2007 по 2019 г. Далее в программе MapInfo12 мы усреднили значения каждого месяца за весь период измерений, тем самым получив многолетние среднемесячные карты суммарной солнечной радиации.

Как видно на рис. 5 суммарная солнечная радиация распределяется зонально. Наиболее обеспеченный суммарной солнечной радиацией район — Алтайский, среднегодовые значения тут достигают 170 Вт/м².

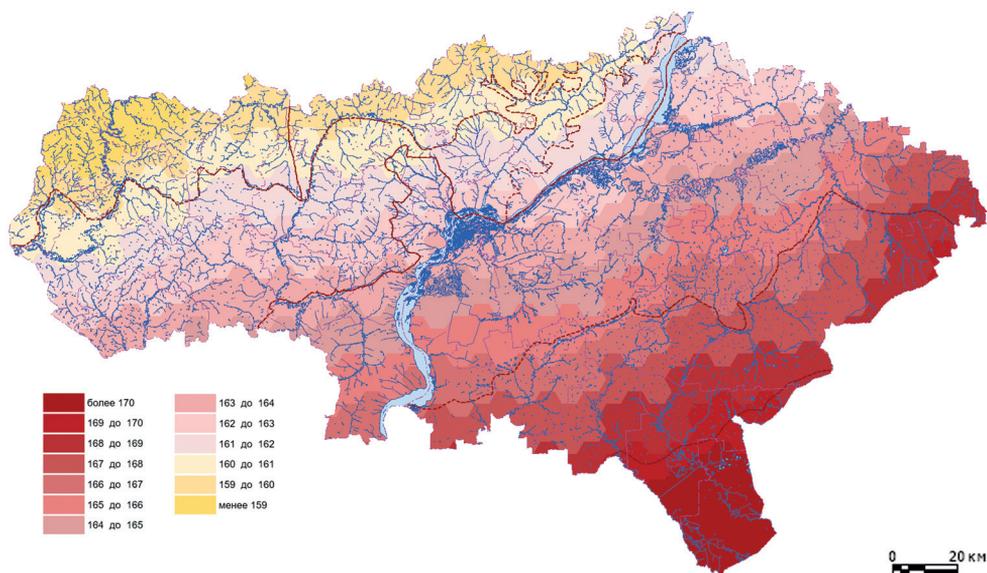


Рис. 5. Многолетнее среднее значение суммарной солнечной радиации (Вт/м²) по ячейкам на территорию Саратовской области (период с 2007 по 2019 г.)

На рис. 6 и 7 представлены карты средних значений суммарной солнечной радиации на территории Саратовской области за менее и наиболее обеспеченные суммарной солнечной радиацией месяцы — январь и июнь. Высокие значения суммарной солнечной радиации наблюдаются в летние месяцы, максимальные значения — в июне. Наименьшие значения наблюдаются в зимние месяцы, минимальные значения — в январе.

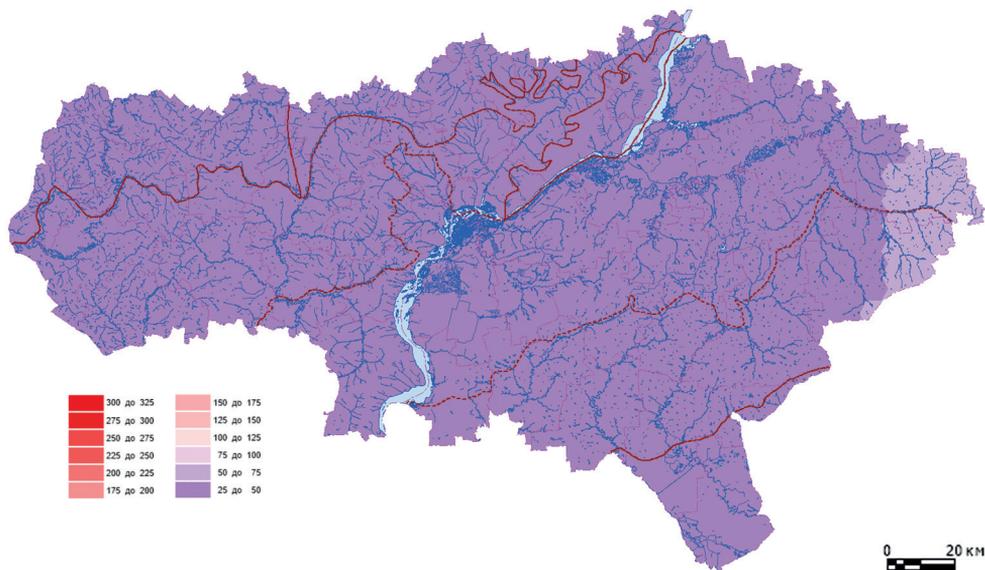


Рис. 6. Среднее значение суммарной солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) за январь на территорию Саратовской области (период с 2007 по 2019 г.)

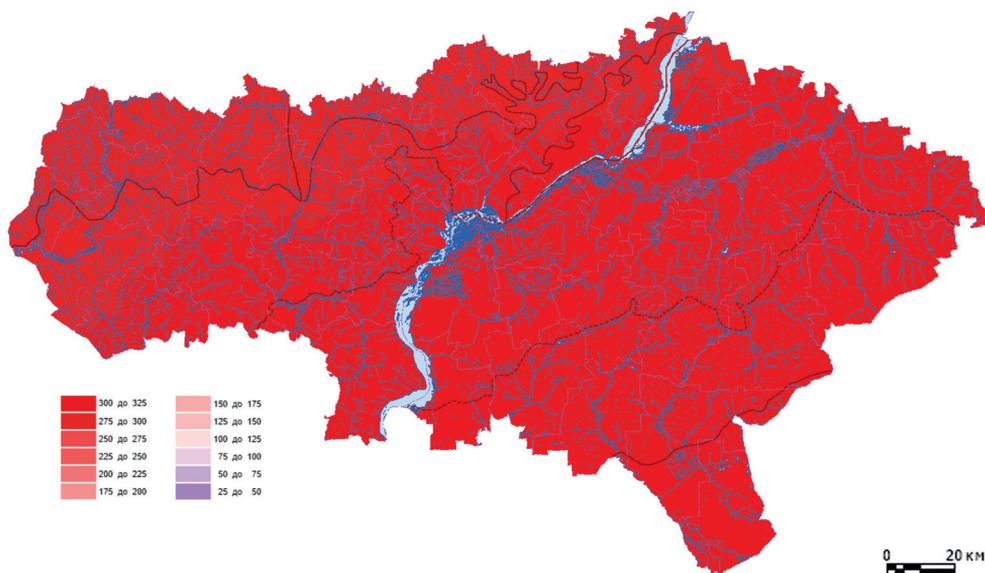


Рис. 7. Среднее значение суммарной солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) за июнь на территорию Саратовской области (период с 2007 по 2019 гг.).

Проведя анализ карт рис. 5–7 можно сделать вывод о наиболее благоприятном районе для размещения гелиоэнергетических установок — Алтайский район. Зимой значения здесь обычно не ниже 30 Вт/м^2 , а летом достигают 320 Вт/м^2 .

ЛИТЕРАТУРА

- Богданов М. Б., Червяков М. Ю.* Оценка времени реакции и чувствительности земной климатической системы к радиационному воздействию // Изв. Саратовского ун-та. Новая сер. Сер.: Науки о Земле. 2019. Т. 19. Вып. 4. С. 216–223. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-216-223>.
- Богданов М. Б., Червяков М. Ю.* Оценка частотной характеристики реакции глобальной температуры на изменение радиационного воздействия // Изв. Саратовского ун-та. Новая сер. Сер.: Науки о Земле. 2022. Т. 22. Вып. 2. С. 83–87. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-83-87>.
- Богданов М. Б., Воробьев В. А., Котума А. И., Червяков М. Ю.* Связь шкал измерителей коротковолновой отраженной радиации ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 1 и № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 252–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-252-260.
- Богданов М. Б., Морозова С. В., Червяков М. Ю.* Влияние факторов солнечной активности на земную климатическую систему. Саратов: Саратовский ун-т, 2021. 88 с.
- Богданов М. Б., Червяков М. Ю., Кошель А. А.* Десятилетний ряд глобального распределения альбедо по данным ИСЗ «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 243–251. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-243-251.
- Невидимова О. Г., Янкович Е. П.* Климатические условия развития гелиоэнергетики на территории западной Сибири // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 276.
- Нейштадт Я. А., Червяков М. Ю.* (2020а) Оценка характеристик солнечной радиации на территории Саратовской области для целей гелиоэнергетики // Актуальные проблемы контроля окружающей среды: материалы семинара. Севастополь, 10–11 нояб. 2020. Севастополь: Куликов А. С., 2020. С. 66.
- Нейштадт Я. А., Червяков М. Ю.* (2020б) Изменчивость потоков солнечной радиации на территории Саратовской области // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 16–20 нояб. 2020. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 36. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- Нейштадт Я. А., Червяков М. Ю.* Изменчивость солнечной радиации в г. Петропавловск-Камчатский по данным спутниковых и наземных наблюдений // Молодежь. Наука. Инновации. 2021. Т. 1. С. 467–471.
- Нейштадт Я. А., Митюкова Е. И., Червяков М. Ю.* Спутниковый мониторинг температуры поверхности в городах Саратовской области // Шаг в науку: сб. материалов 4-й Международ. научно-практ. конф. с участием студентов. Грозный, 15 окт. 2021. Махачкала: АЛЕФ, 2021. С. 341–345.
- Скляров Ю. А., Воробьев В. А., Котума А. И., Червяков М. Ю., Фейгин В. М.* (2012а) Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ «Метеор-М» № 1. Аппаратура ИКОР-М // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 173–180.
- Скляров Ю. А., Воробьев В. А., Котума А. И., Червяков М. Ю., Фейгин В. М.* (2012б) Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 83–90.
- Скляров Ю. А., Червяков М. Ю., Воробьев В. А., Котума А. И., Фейгин В. М.* (2013а) Особенности распределения поглощённой солнечной радиации в 2010–2012 годах по данным

- с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 272–283.
- Скляров Ю. А., Червяков М. Ю., Воробьёв В. А., Котума А. И., Фейгин В. М. (2013б) Особенности распределения альbedo в 2010–2012 годах по данным с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 107–117.
- Скляров Ю. А., Червяков М. Ю., Воробьёв В. А., Котума А. И., Фейгин В. М. (2013в) Некоторые результаты обработки данных поглощённой солнечной радиации и альbedo, полученных с помощью аппаратуры ИКОР-М // Изв. Саратовского ун-та. Новая сер. Сер.: Науки о Земле. 2013. Вып. 2. Т. 13. С. 30–33.
- Червяков М. Ю. (2020а) Спутниковый мониторинг составляющих радиационного баланса Земли по данным радиометра ИКОР-М // Цифровая география: материалы Всероссийской научно-практ. конф. с международ. участием. Пермь, 16–18 сент. 2020. Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2020. В 2 т. Т. 1. Цифровые и геоинформац. технологии в изучении природ. процессов, экологии, природопользовании и гидрометеорологии. С. 451–454.
- Червяков М. Ю. (2020б) Результаты десятилетней работы измерителей коротковолновой отраженной радиации ИКОР-М на гидрометеорологических спутниках серии «Метеор-М» // Актуальные проблемы контроля окружающей среды: материалы семинара, Севастополь, 10–11 нояб. 2020. Севастополь: Куликов А. С., 2020. С. 12.
- Червяков М. Ю., Нейштатт Я. А. Актинометрические методы измерений: учебно-метод. пособие для студентов геогр. фак. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2018. 42 с.
- Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Chervyakov M. Yu., Denisov K. E., Solodovnikov A. P., Semeno-va N. V. (2021a) Estimation of the response of The Earth's climatic system to the growth of carbon dioxide gas content in the atmosphere // Proc. 27th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. Art. No. 1191670. 5 p. <https://doi.org/10.1117/12.2603938>.
- Morozova S. V., Denisov K. E., Polyanskaya E. A., Chervyakov M. Yu., Pryakhina S. I., Ormeli E. I. (2021b) Climatic variability forecast based on feedback relations // Proc. 27th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. Art. No. 119166Y. 9 p. <https://doi.org/10.1117/12.2603727>.
- Neyshtadt Y. A., Chervyakov M. Y. The climatic conditions for the solar industry development in the lower Volga region // Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science: материалы 10-й Науч. конф. молодых ученых. Саратов, 16 апр. 2019. Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2020. P. 77–84.

SATELLITE MONITORING OF SOLAR RADIATION FLUX FOR THE DEVELOPMENT OF SOLAR ENERGY IN THE SARATOV REGION

Y. A. Neyshtadt, M. Yu. Chervyakov

Saratov State University (SSU), Saratov, Russia

The paper discusses the assessment of climatic conditions for solving the problems of solar energy in the Saratov region. A comparative analysis of ground-based actinometric data from the World Radiation Center of the Main Geophysical Observatory and data from the CERES satellite project (NASA) has been carried out. Based on long-term satellite data for the south-east of the European territory of Russia, their seasonal and spatial variability has been studied. As a result of the analysis, some features of the receipt of solar energy were revealed. Performed zoning of the Saratov region using the MapInfo program based on data from the CERES satellite project, which made it possible to differentiate the territory by the peculiarities of the radiation regime. The conclusion is made about the most suitable territory for the location of solar power stations.

Keywords: solar energy, total solar radiation, CERES, climatic potential, solar energy, solar radiation

Neyshtadt Yakov Andreevich — master's degree student, yasha.nejshtadt@mail.ru

Chervyakov Maxim Yurievich — head of department of meteorology and climatology, candidate of geographic sciences

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПАССИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРА ДАН НА БОРТУ МАРСОХОДА «КЬЮРИОСИТИ»

С. Ю. Никифоров, М. В. Дьячкова, И. Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, Д. И. Лисов, А. Б. Санин

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

Приводятся результаты обработки данных пассивных измерений прибора динамическое альbedo нейтронов (ДАН), который установлен на борту марсохода «Кьюриосити». Рассматриваемые данные получены из пассивных операций ДАН, когда прибор измеряет поток нейтронов альbedo поверхности, создаваемое бомбардировкой галактическими космическими лучами и облучением от многоцелевого радиоизотопного термоэлектрического генератора, установленного на борту марсохода. Для анализа данных применялся ранее предложенный метод оценки содержания водного эквивалента водорода (ВЭВ) на основе пассивных измерений с использованием результатов активных измерений прибора ДАН. Было установлено, что средняя концентрация ВЭВ на участке 20 км составляет 2,6–0,7 мас. %, что соответствует результатам оценки методом активного нейтронного зондирования.

Ключевые слова: исследование Марса, марсоход, нейтронная спектроскопия, вода

ВВЕДЕНИЕ

Исследования распределения водного эквивалента водорода (ВЭВ) в веществе марсианской поверхности ведутся более четырёх десятилетий, результаты таких исследований свидетельствуют о сложной взаимосвязи процессов, происходивших за время эволюции Марса (Boynnton, 2002; Boynnton et al., 2004; Malakhov et al., 2020; Mitrofanov, 2002; Mitrofanov et al., 2008, 2012). В статье пойдёт речь о результатах распределения ВЭВ в подповерхностном слое грунта Марса согласно пассивным измерениям прибора динамическое альbedo нейтронов (ДАН) в составе марсохода НАСА NASA (Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства — *англ.* NASA, National Aeronautics and Space Administration) «Кьюриосити» (*англ.* Curiosity — любопытство, любознательность) (Jun et al., 2013; Litvak et al., 2008, 2014; Mitrofanov et al., 2012, 2014). Настоящая работа отражает результаты применения ранее представленного метода оценки содержания ВЭВ на основе пассивных измерений с использованием результатов активных измерений прибора ДАН, описание которого приводится в ранее опубликованной работе (Никифоров и др., 2021). В настоящей работе рассматривается период измерений, выполненный на промежутке пути 20 км.

Содержание воды в веществе современного Марса характеризует особенности гидрологической эволюции планеты и также процессы взаимодействия грунта и атмосферы в современную эпоху. Особый интерес представляет изучение локальных областей Марса, где возможно проведение детальных измерений

Никифоров Сергей Юрьевич — научный сотрудник, nikiforov@np.cosmos.ru

Дьячкова Майя Викторовна — младший научный сотрудник

Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом,

доктор физико-математических наук

Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией,

доктор физико-математических наук

Лисов Денис Игоревич — младший научный сотрудник

Санин Антон Борисович — старший научный сотрудник,

кандидат физико-математических наук

химического и элементного состава вещества, так как это вещество могло образоваться в эпоху, когда на Марсе присутствовала вода в жидком виде.

Марсоход «Кьюриосити» входит в состав научной миссии НАСА – Марсианская научная лаборатория (*англ.* Mars Science Laboratory). Цель миссии заключается в поиске следов жизни и изучения эволюции марсианского климата (Grotzinger et al., 2012). В качестве района научных исследований миссии НАСА был выбран приэкваториальный кратер Гейл (*англ.* Gale crater). В состав миссии был включён российский прибор ДАН (Litvak et al., 2008; Mitrofanov et al., 2012), который установлен на борту марсохода «Кьюриосити» и позволяет проводить оценки распределения воды вдоль пути следования марсохода.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ДАН

Прибор ДАН имеет в составе детекторный блок — ДАН ДЭ и блок импульсного нейтронного генератора — ДАН ИНГ. Блок ДАН ИНГ, позволяет облучать поверхность короткими импульсами нейтронов с энергией 14 МэВ на заданный период времени. Блок ДАН ДЭ содержит два пропорциональных счётчика, регистрирующих тепловые и эпитепловые нейтроны, которые названы соответственно counter of epithermal neutron (CETN) и counter of total neutron (CTN) (Mitrofanov et al., 2012).

Поток нейтронов, выходящих из грунта и детектируемых прибором ДАН, и его эволюция со временем определяются процессами замедления и поглощения нейтронов в марсианском грунте. Доля энергии, теряемая нейтроном при каждом упругом соударении, тем выше, чем меньше масса ядра, участвующего в соударении. В связи с этим добавление к составу грунта даже небольшого количества водородосодержащего вещества приводит к тому, что эффективность замедления нейтронов существенно увеличивается и динамика выхода из грунта эпитепловых и тепловых нейтронов значительно изменяется. Таким образом, анализ временного профиля перерассеянных и замедлившихся нейтронов, выходящих из грунта, позволяет судить как о содержании водорода в подповерхностном слое, так и о его распределении по глубине.

Измерения, полученные с помощью нейтронного генератора ИНГ, получили название «активные измерения», по аналогии с активацией вещества подповерхностного слоя. Результаты данных измерений показали высокую эффективность применения этого метода для планетных исследований. Пространственное разрешение нейтронного зондирования в одном измерении составляет порядка 3 м (Lisov et al., 2018; Sanin et al., 2015), поэтому суммарная доля пути вдоль трассы движения марсохода, которая была исследована прибором ДАН в активном режиме, составляет не более 12 % от полного пути. Данные активных измерений позволяют определить характерные значения концентрации воды и нейтрон-абсорбирующей компоненты (в основном хлор) в веществе кратера Гейл, но по этим данным в принципе нельзя узнать, с каким линейным масштабом изменяется содержание воды в веществе вдоль трассы движения марсохода, и с какими особенностями локального рельефа могут быть связаны эти изменения.

Поэтому возможность непрерывных измерений содержания воды вдоль трассы представляет значительный интерес.

ПАССИВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИБОРА ДАН

Профили нейтронного излучения поверхности в пассивном режиме прибора ДАН измеряются непрерывно с временным разрешением 20 с как на стоянках

марсохода, так и во время его движения. Учитывая данные о текущих координатах марсохода, на основе временных профилей отсчётов нейтронов были построены профили пространственной переменности потока тепловых и эпитепловых нейтронов вдоль всей трассы движения марсохода с 9 августа 2012 г. по 2 ноября 2018 г.

Соответственно, по данным пассивных измерений построен профиль пространственной переменности нейтронного потока поверхности с пространственным разрешением 3 м, который выражен как параметр F_{DAN} . Этот параметр представляет собой отношение темпов счёта детектора СТН к детектору эпитепловых нейтронов СЕТН. Примеры профилей пространственной переменности параметра F_{DAN} с пространственным разрешением 3 м представлены на рис. 1 для различных участков трассы.

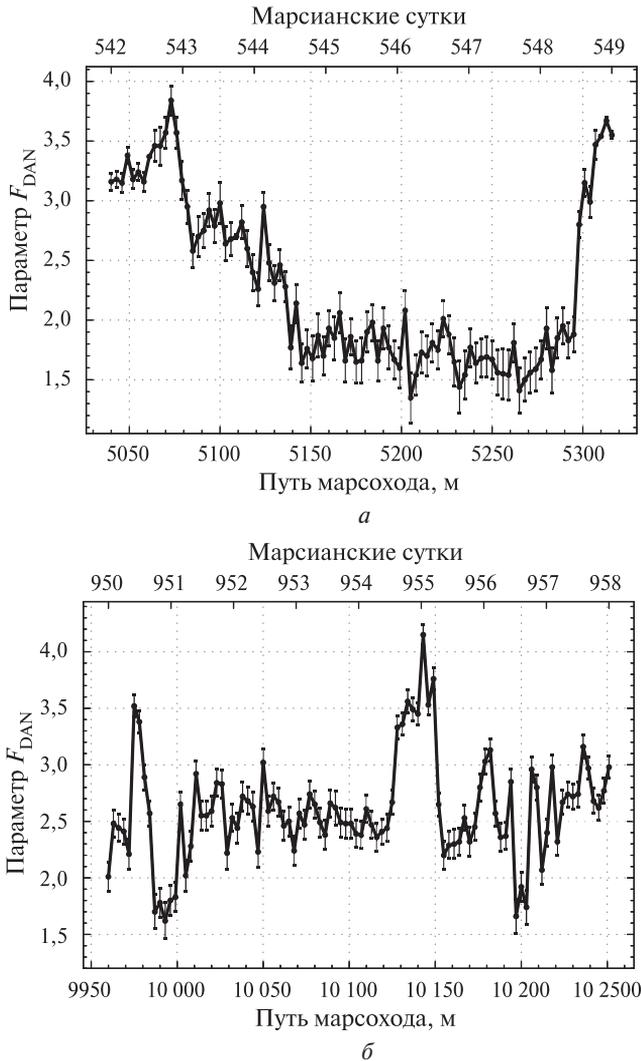


Рис. 1. Примеры профилей вариаций F_{DAN} с пространственным разрешением 3 м для нескольких интервалов пути марсохода: а — 5020–5330 м (542–548 марсианских суток); б — 9960–10270 м (951–957 марсианских суток).

Известно, что величина $F_{\text{ДАН}}$ зависит как от величины массовой доли ВЭВ в грунте Марса, которая определяет эффективность замедления нейтронов и тем самым влияет на соотношение потоков тепловых и эпитепловых нейтронов, так и от вариаций массовой доли хлора Cl, которая определяет степень ослабления потока тепловых нейтронов вследствие их поглощения. Ранее был представлен метод оценки содержания ВЭВ на основе пассивных измерений с использованием результатов активных измерений прибора ДАН, описание которого приводится в ранее опубликованной работе (Никифоров и др., 2021). В основе данного метода используется значение параметра — отношения нейтронных потоков $F_{\text{ДАН}}$ — и сопоставляются оценки значения хлора в месте проведения измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты обработки пассивных измерений ДАН, выполненные как во время движения, так и на стоянках, приведены на рис. 2, также на этом распределении приведены результаты активных измерений, выполненные в местах стоянок. Видно, что эти распределения с хорошей степенью достоверности согласуются друг с другом; их средние значения и дисперсия совпадают с достаточно высокой точностью. Здесь приведено распределение значения ВЭВ по результатам активных и пассивных измерений вдоль трассы движения марсохода на масштабе расстояний порядка десятка километров. Всего пройдено примерно 20 км от места посадки в выбранном интервале данных с 9 августа 2012 г. по 2 ноября 2018 г. Из анализа данных следует, что среднее значение оценки ВЭВ по пассивным измерениям соответствует $2,6 \pm 0,7$ %, оценка ВЭВ по результатам активных измерений соответствует $2,5 \pm 0,3$ %.

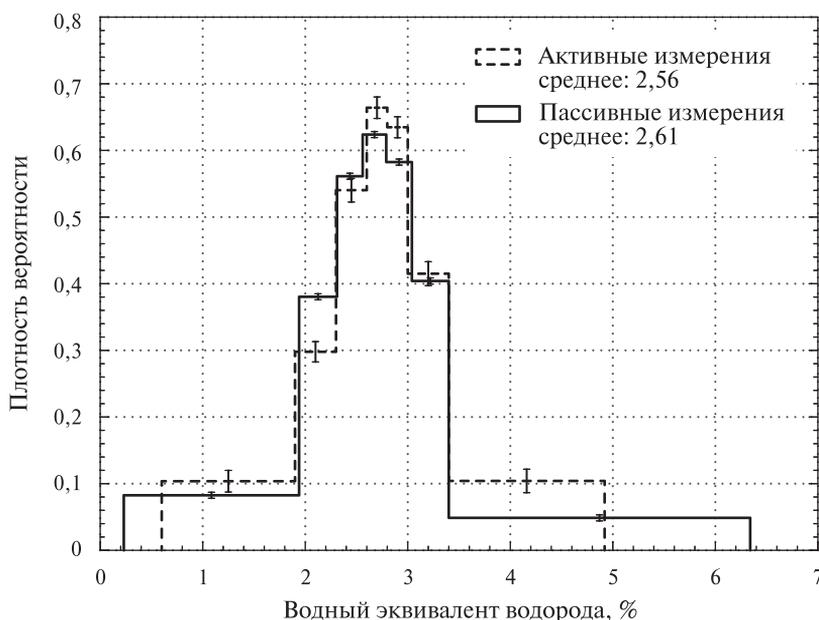


Рис. 2. Распределение содержания ВЭВ на основе активных измерений в местах стоянок марсохода и пассивных измерений за период с 9 августа 2012 г. по 2 ноября 2018 г. Все области распространения нормированы на единицу.

ЛИТЕРАТУРА

- Никифоров С. Ю., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Дьячкова М. В., Лисов Д. И., Санин А. Б. Оценка содержания воды в марсианском грунте вдоль трассы движение марсохода «Кьюриосити» по данным пассивных измерений прибора ДАН // 18-я Конф. молодых учёных «Фундамент. и приклад. космич. исслед.». ИКИ РАН, Москва, 14–16 окт. 2020: сб. тр. / под ред. А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 72–78. DOI: 10.21046/KMU-2021-72-78.
- Boynton W. V. Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits // *Science*. 2002. V. 297(5578). P. 81–85. DOI: 10.1126/science.1073.
- Boynton W. V., Feldman W. C., Mitrofanov I. G., Evans L. G., Reedy R. C., Squyres S. W., Starr R., Trombka J. I., d’Uston C., Arnold J. R., Englert P. A. J., Metzger A. E., Wänke H., Brückner J., Drake D. M., Shinohara C., Fellows C., Hamara D. K., Harshman K., Kerry K., Turner C., Ward M., Barthe H., Fuller K. R., Storms S. A., Thornton G. W., Longmire J. L., Litvak M. L., Ton’chev A. K. The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer Instrument Suite // *Space Science Reviews*. 2004. V. 110(1/2). P. 37–83. DOI: 10.1023/b:spac.0000021007.76126.15.
- Grotzinger J. P., Crisp J., Vasavada A. R., Anderson R. C., Baker C. J., Barry R., Ferdowski B., Gilbert J. B., Golombek M., Jandura L., Maki J., Simmonds J. J., Welch R. V. Mars science laboratory mission and science investigation // *Space Science Reviews*. 2012. V. 170(1–4). P. 5–56. DOI: 10.1007/s11214-012-9892-2.
- Jun I., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B., Kim W., Behar A., Boynton W. V., DeFlores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M., Nikiforov S., Shvetsov V. N., Tate C., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. Neutron background environment measured by the Mars science Laboratory’s dynamic albedo of neutrons instrument during the first 100 sols // *J. Geophysical Research: Planets*. 2013. V. 118(11). P. 2400–2412. <https://doi.org/10.1002/2013JE004510>.
- Lisov D. I., Litvak M. L., Kozyrev A. S., Mitrofanov I. G., Sanin A. B. Data processing results for the active neutron measurements by the DAN instrument on the curiosity Mars rover // *Astronomy Letters*. 2018. V. 44(7). P. 482–489. DOI: 10.1134/S1063773718070034.
- Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Barmakov Y. N., Behar A., Bitulev A., Bobrovitsky Yu., Bogolubov E. P., Boynton W. V., Bragin S. I., Churin S., Grebennikov A. S., Konovalov A., Kozyrev A. S., Kurdumov I. G., Krylov A., Kuznetsov Yu. P., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Ryzhkov V. I., Sanin A. B., Shvetsov V. N., Smirnov G. A., Sholeninov S., Timoshenko G. N., Tomilina T. M., Tuvakin D. V., Tretyakov V. I., Troshin V. S., Uvarov V. N., Varenikov A., Vostrukhin A. The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment for NASA’s 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8(3). P. 605–612. <https://doi.org/10.1089/ast.2007.0157>.
- Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Lisov D., Behar A., Boynton W. V., DeFlores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M., Nikiforov S., Shvetsov V. N., Stack K., Starr R., Tate C., Tretyakov V. I., Vostrukhin A., the MSL Team Local variations of bulk hydrogen and chlorine-equivalent neutron absorption content measured at the contact between the Sheepbed and Gillespie Lake units in Yellowknife Bay, Gale Crater, using the DAN instrument onboard curiosity // *J. Geophysical Research: Planets*. 2014. V. 119(6). P. 1259–1275. <https://doi.org/10.1002/2013JE004556>.
- Malakhov A. V., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B., Golovin D. V., Djachkova M. V., Nikiforov S. Yu., Anikin A. A., Lisov D. I., Lukyanov N. V., Mokrousov M. I. Ice Permafrost “Oases” Close to Martian Equator: Planet Neutron Mapping Based on Data of FRIEND Instrument Onboard TGO Orbiter of Russian-European ExoMars Mission // *Astronomy Letters*. 2020. V. 46(6). P. 407–421. DOI: 10.1134/S1063773720060079.
- Mitrofanov I. G. Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297(5578). P. 78–81. DOI: 10.1126/science.107361.
- Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Golovin D. V., Litvak M. L., Konovalov A. A., Kozyrev A. S., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Tretyakov V. I., Troshin V. S., Uvarov V. N., Varenikov A. B., Vostrukhin A. A., Shevchenko V. V., Shvetsov V. N., Krylov A. R., Timoshenko G. N., Bobrovni-

- tsky Y. I., Tomilina T. M., Grebennikov A. S., Kazakov L. L., Sagdeev R. Z., Milikh G. N., Bartels A., Chin G., Floyd S., Garvin J., Keller J., McClanahan T., Trombka J., Boynton W., Harshman K., Starr R., Evans L.* Experiment LEND of the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter for High-Resolution Mapping of Neutron Emission of the Moon // *Astrobiology*. 2008. V. 8(4). P. 793–804. DOI: 10.1089/ast.2007.0158.
- Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Varenikov A. B., Barmakov Y. N., Behar A., Bobrovitsky Y. I., Bogolubov E. P., Boynton W. V., Harshman K., Kan E., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Ponomareva S. N., Ryzhkov V. I., Sanin A. B., Smirnov G. A., Shvetsov V. N., Timoshenko G. N., Tomilina T. M., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. A.* Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Science Reviews*. 2012. V. 170(1–4). P. 559–582. DOI: 10.1007/s11214-012-9924-y.
- Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B., Starr R. D., Lisov D. I., Kuzmin R. O., Behar A., Boynton W. V., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Milliken R. E., Mischna M. A., Moersch J. E., Tate C. G.* Water and chlorine content in the Martian soil along the first 1900 m of the curiosity rover traverse as estimated by the DAN instrument // *J. Geophysical Research: Planets*. 2014. V. 119(7). P. 1579–1596. <https://doi.org/10.1002/2013JE004553>.
- Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Lisov D. I., Starr R., Boynton W., Behar A., DeFlores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmina R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M. I., Nikiforov S., Shvetsov V. N., Tate C., Tretyakov V. I., Vostrukhin A.* Data processing of the active neutron experiment DAN for a Martian regolith investigation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2015. V. 789. P. 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.03.085>.

THE RESULTS OF DATA PROCESSING FROM PASSIVE MEASUREMENTS OF THE DAN INSTRUMENT ON BOARD THE CURIOSITY ROVER

S. Yu. Nikiforov, M. V. Dyachkova, I. G. Mitrofanov, M. L. Litvak, D. I. Lisov, A. B. Sanin

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

This paper presents the results of processing data from passive measurements of the Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) instrument, which is on board the Curiosity rover. The observed data are gathered from DAN passive operations, when the instrument measures the neutron albedo flux interacted by galactic cosmic ray bombardment and irradiation from a multi-purpose radioisotope thermoelectric generator installed on board the rover. To analyze the data, we used the previously proposed method for estimating the content water equivalent of hydrogen (WEH) based on passive measurements using the results of active measurements of the DAN instrument. It was found that the average concentration of WEH in the area of 20 km is 2.6–0.7 wt. %, which corresponds to the results of the assessment by the method of active neutron probing.

Keywords: Mars exploration, rover, neutron spectroscopy, water

Nikiforov Sergey Yurievich — researcher, nikiforov@np.cosmos.ru

Djachkova Maya Viktorovna — junior researcher

Mitrofanov Igor Georgievich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences

Litvak Maxim Leonidovich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences

Lisov Denis Igorevich — junior researcher

Sanin Anton Borisovich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ И РЕЖИМОВ ОРИЕНТАЦИИ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. О. Николаев, С. Н. Семенович, И. П. Стецко

Белорусский государственный университет (БГУ), Минск, Беларусь

Представленная работа описывает разработанную систему ориентации наноспутника, обеспечивающую возможность отработки различных пользовательских алгоритмов и режимов эксплуатации. Настройка режима работы выполняется за счёт изменяемых конфигурационных параметров алгоритмов ориентации. Качество и скорость выполнения манёвра ориентации оценивается за счёт аппаратного протоколирования показаний бортовых датчиков на всех этапах отработки алгоритмов. Реализован оптический метод наземного тестирования системы ориентации в одноосном приближении.

Ключевые слова: наноспутник, система ориентации, образовательная лаборатория, наземное тестирование системы ориентации

ВВЕДЕНИЕ

Сверхмалые космические аппараты (СМКА) представляют интерес не только в качестве образовательных спутников, но и как перспективная развивающаяся платформа для прикладных и исследовательских задач (Villela et al., 2019), в связи с чем разработка малогабаритных систем ориентации представляется авторам актуальной задачей.

Наноспутник BSUSat-2 стандарта CubeSat 3U был разработан как орбитальная часть научно-образовательной лаборатории, предназначенной для проведения научных экспериментов, отработки алгоритмов и проверки различных функциональных режимов служебных подсистем при подготовке кадров для аэрокосмической отрасли. Для выполнения указанных задач миссии система ориентации (СО), как одна из ключевых служебных подсистем СМКА, должна позволять студенту или сотруднику испытывать различные режимы работы СО и проводить анализ результатов по выполнению заданных манёвров не нарушая общей работоспособности СМКА.

АППАРАТНЫЙ СОСТАВ МОДУЛЯ ОРИЕНТАЦИИ (МО)

Конструктив СМКА BSUSat-2 представляет собой модульную структуру, где различные функциональные модули (слоты) объединяются общей материнской платой. Большинство модулей имеет схожую аппаратную структуру: унифицированная микропроцессорная платформа, схема энергоснабжения и подсистема коммуникации. Функциональный состав/набор электронных периферийных устройств каждого модуля зависит от его назначения и роли в космической миссии (Саечников и др., 2020). Внешний вид модуля электромагнитной ориентации СМКА BSUSat-2 представлен на рис. 1.

Николаев Алексей Олегович — стажёр младшего научного сотрудника, студент, lesha.nikolaev.2000@mail.ru

Семенович Сергей Николаевич — заведующий лабораторией, кандидат технических наук, доцент, semenovich@bsu.by

Стецко Игорь Петрович — ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, stetsko@bsu.by

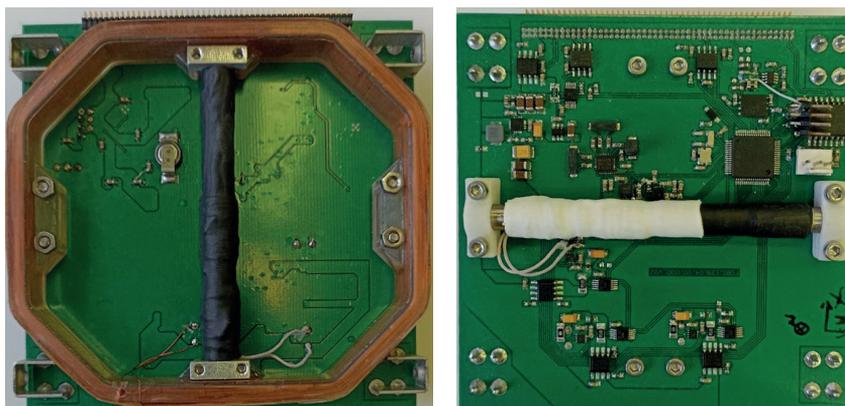


Рис. 1. Инженерная модель модуля электромагнитной ориентации (вид с обеих сторон)

Основной элемент модуля — малопотребляющий микроконтроллер STM32 с ядром Cortex-M4, обладающий «лётной историей». Данный микроконтроллер осуществляет управление МО, обеспечивает сбор данных с датчиков, выполняет определение текущей ориентации, расчёт требуемых магнитных моментов управляющих катушек, управление током катушек, запись лог-файлов в микросхеме энергонезависимой памяти модуля, обеспечивает коммуникацию с другими подсистемами наноспутника и выполнение адресованных ему пользовательских и служебных команд.

Для защиты от непредвиденных состояний алгоритмов микроконтроллера МО используется внешняя схема сброса, которая перезагружает микроконтроллер, если он перестаёт по какой-то причине отправлять на неё контрольные импульсы.

В МО использована микросхема магниторезистивной памяти (MRAM) с объёмом памяти 512 Кбайт. Внешняя память используется для хранения необходимых параметров МО и для записи лог-файлов, в которые могут быть сохранены выбранные пользователем измерительные данные с заданным темпом.

Исполнительными органами МО служат три взаимно ортогональные электромагнитные катушки, расположенные параллельно осям симметрии наноспутника. Из-за технических ограничений, вызванных унификацией внешних габаритов МО, для увеличения создаваемого момента две из трёх катушек модуля содержат сердечник из пермаллоя. Максимальный магнитный момент катушек с сердечниками равен $0,11 \text{ A}\cdot\text{м}^2$. Третья не имеет сердечника, но занимает значительную площадь платы и может создавать магнитный момент до $0,16 \text{ A}\cdot\text{м}^2$. Каждая катушка управляется индивидуальным мостовым драйвером.

Модуль ориентации также содержит датчики ориентации: МЭМС (микро-электромеханические системы) гироскоп и акселерометр, анизотропный магниторезистивный магнитометр и индуктивный магнитометр. Разъём модуля служит для его присоединения к материнской плате, четыре боковых крепления позволяют надёжно зафиксировать МО внутри корпуса наноспутника.

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ

На рис. 2 представлена блок-схема реализованной СО СМКА BSUSat-2. Цели системы ориентации состоят в слежении за положением и управлении движением наноспутника относительно его центра масс. Для выполнения данных целей

в МО присутствуют различные датчики, показания которых позволяют определить мгновенное положение наноспутника относительно опорной системы координат и скорость изменения этого положения.

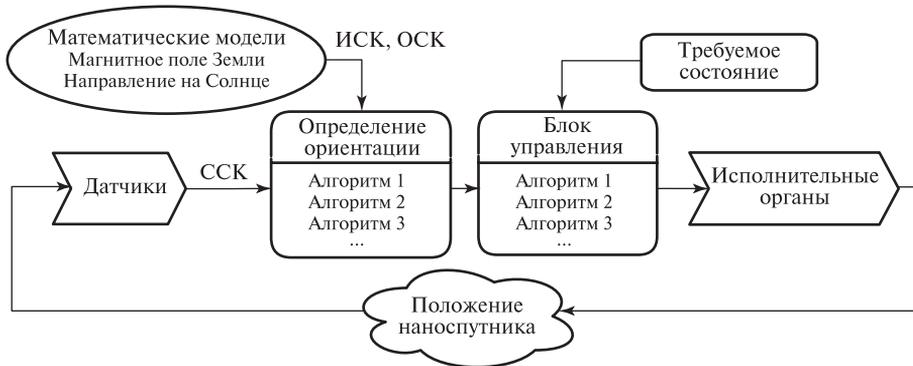


Рис. 2. Блок-схема реализованной системы ориентации

В МО доступны показания измерений с двух трёхосевых магнитометров и МЭМС инерциального измерительного модуля. На борту спутника в составе других модулей также присутствуют сенсоры, измерения с которых могут быть доступны модулю системы ориентации по запросу. К ним относятся солнечные датчики, расположенные на четырёх гранях наноспутника, и магнитометр, размещённый в модуле фото- и видеофиксации.

Решение задачи определения текущего положения СМКА обеспечивается блоком системы определения ориентации. Данный блок представляет собой программную реализацию математического алгоритма определения ориентации СМКА в используемой системе координат. Задача определения углового положения наноспутника относительно некоторой системы координат практически всегда сводится к минимизации функции потерь (Markley, 1999).

Получение необходимых данных в связанной системе координат обеспечивается бортовыми датчиками; определение опорных векторов в инерциальной системе координат (ИСК) обеспечивается их моделированием с помощью известных математических моделей. В управляющем модуле реализованы модели магнитного поля Земли, вектора направления на Солнце и модели орбитального движения СМКА. Альтернативным вариантом модели движения наноспутника по орбите может быть использование данных с бортового навигационного приёмника. Определение векторов магнитного поля и направления на Солнце в других системах координат обеспечивается расчётом в ИСК с последующим трансформированием полученных значений в другие системы координат.

На выходе системы определения ориентации СМКА полученный кватернион ориентации может быть использован системой контроля ориентации для расчёта механического момента, необходимого для поворота в заданное положение и удержания в нём.

Требуемый механический момент, рассчитанный блоком системы контроля ориентации, создаётся с помощью исполнительных органов МО — электромагнитных катушек, создающих магнитный момент в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Взаимодействие этих электромагнитных катушек с магнитным полем Земли приводит к созданию механического момента. Механический момент, приложенный со стороны исполнительных органов, в сумме с внешними возмущениями приводит к изменению положения наноспутника.

Исходя из научно-образовательных задач, МО разрабатывался с возможностью выполнения пользовательских алгоритмов определения и управления ориентацией, или изменения параметров используемых математических моделей. Выполнение орбитальных экспериментальных задач с одновременным выполнением алгоритмов ориентации и стабилизации может осуществляться разными математическими методами. Оператору с Земли остаётся лишь выбрать алгоритм для каждого блока СО, который необходимо использовать для выполнения требуемой задачи.

КОНФИГУРИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ И ЗАПИСЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Во внешней памяти МО выделена область под конфигурационные параметры, которые считываются микроконтроллером при его запуске и используются в качестве входных данных для рабочих алгоритмов. Оставшееся пространство памяти может использоваться для записи лог-файлов.

Конфигурационные параметры задают настройки исполнения программного алгоритма МО и могут быть изменены оператором с Земли. Оператор может перенастраивать рабочий алгоритм МО для выполнения разных задач и проверять результаты выполнения алгоритма при различных значениях управляющих параметров. Конфигурационные параметры отвечают, например, за выбор алгоритма определения и управления ориентацией наноспутника, хранят калибровочные параметры используемых датчиков ориентации и коэффициенты управляющего алгоритма.

На борту наноспутника имеется три набора параметров для каждого модуля: оперативный, постоянный и заводской. Постоянный набор параметров находится во внешней памяти и может быть изменён командой с Земли. Данный набор энергонезависимый, следовательно, после его изменения и перезагрузки платы изменённые параметры сохраняются и будут загружены в оперативную память микроконтроллера при включении модуля. В целях дополнительной защиты от влияния высокоэнергетических частиц постоянный набор параметров имеет трёхкратное резервирование.

Оперативный набор хранится в оперативном запоминающем устройстве микроконтроллера МО и первоначально загружается из внешней памяти (постоянный набор) при запуске микроконтроллера. Именно этот набор используется непосредственно в работе программы микроконтроллера. Перед загрузкой конфигурационных параметров из внешней памяти проводится проверка целостности данных. В случае обнаружения ошибки проводится проверка второго и третьего набора постоянных параметров и загружается набор, прошедший проверку на целостность.

В том случае, если все три набора оказываются повреждёнными, используется заводской набор параметров, записанный в Flash-памяти микроконтроллера. Заводской набор параметров не меняется после прошивки модуля и используется как резервный и проверенный в наземных условиях, к которому можно всегда вернуться в случае возникновения непредвиденных ошибок. Таким образом обеспечивается защита параметров не только от радиации, но и от ошибок со стороны оператора.

Информация с бортовых датчиков предшествующего наноспутника BSUSat-1, работающего на орбите с 2018 г., собиралась приёмом телеметрических данных радиостанциями, расположенными в различных точках Земли. Такой подход представляется рабочим и позволяет судить о состоянии СМКА не только в зоне видимости наземного комплекса управления, но и на других

точках орбиты. Оператор имеет возможность отправить команду наноспутнику в момент его пролёта над наземным комплексом управления и благодаря глобальной радиолобительской сети SatNOGS получить и оценить результат выполнения команды или алгоритма по телеметрии, принятой радиостанцией, расположенной над другой точкой планеты.

Несмотря на работоспособность такого подхода к сбору данных, ему присущи всё же некоторые недостатки. Во-первых, сеть радиостанций распределена неравномерно по поверхности планеты. Подавляющее большинство приёмников расположены в Европе и Северной Америке (SatNOGS Network). В результате телеметрия наноспутника не может быть собрана непрерывно по всей орбите. Во-вторых, приём пакета телеметрической информации может пройти неудачно, вследствие чего снова появляется неравномерность сбора данных. В-третьих, темп сбора данных привязан к частоте отправки пакетов телеметрии. При повышении частоты возрастает расход энергии СМКА. В итоге получаемые данные отрывочны и могут оказаться недостаточными для получения полной картины исследуемых явлений и режимов эксплуатации СМКА на орбите.

Наличие энергонезависимой памяти даёт возможность записывать конкретные данные, получаемые модулем в течение некоторого промежутка времени с постоянным заданным темпом. При пролёте над наземным комплексом управления записанный файл загружается с СМКА. При обнаружении ошибки приёма файла отдельные его фрагменты оператор может запросить повторно.

В структуре лог-файла присутствует заголовок и массив измерительных данных. Этот массив состоит из определённого числа строк (записей) фиксированной длины, измеряемой в байтах. Содержание строки определяется оператором выбором из имеющихся доступных шаблонов записи.

НАЗЕМНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ

Для проверки алгоритмов стабилизации и ориентации наноспутник был закреплён на струнном подвесе и помещён в клетку Гельмгольца, с помощью которой можно имитировать величину и направление результирующего магнитного поля, подавая токи на обмотки ортогональных катушек (рис. 3). С одной из сторон клетки Гельмгольца на наноспутник направлено излучение от имитатора Солнца. В таких наземных условиях можно проверить алгоритмы стабилизации и ориентации СМКА по магнитному полю и Солнцу относительно одной оси вращения.



Рис. 3. Комплекс для наземного тестирования системы ориентации (вид сверху)

Управление наноспутником и модулями ориентации осуществляется с использованием командной линии канала бортовой радиосистемы СМКА BSUSat-2. Оператор с помощью наземного комплекса управления отправляет команды на включение необходимых модулей, настройку параметров и режимов функционирования и запись лог-файлов для их последующего получения и обработки на компьютере.

В качестве простого демонстрационного теста по проверке работоспособности алгоритма ориентации по Солнцу, основанном на ПД-регуляторе (сочетание пропорционального дифференцирующего регуляторов), было выполнено четыре последовательных манёвра поворота на 90° так, чтобы наноспутник повернулся каждой своей боковой гранью в направлении излучения имитатора Солнца. Во время выполнения манёвров показания магнитометра, гироскопа и датчиков направления на Солнце записывались в лог-файл и были загружены и обработаны по завершению эксперимента. По полученным из лог-файла данным были построены графики зависимости показаний датчиков от времени (рис. 4).

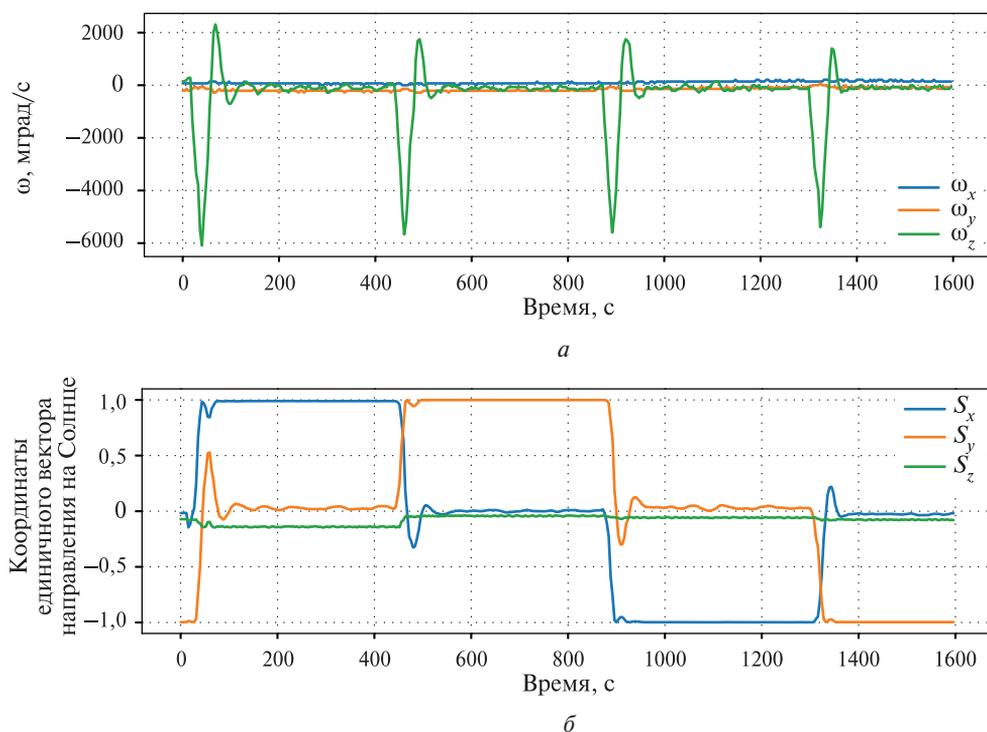


Рис. 4. Графики зависимости показаний бортовых датчиков от времени при четырёх последовательных манёврах поворота на 90° : *a* — гироскоп; *б* — датчик направления на Солнце

Для оценки качества наведения наноспутника на цель в одноосном приближении используется следующая схема эксперимента (рис. 5). На одном из модулей наноспутника закреплён лазер, излучение которого по направлению совпадает с направлением камер СМКА. По радиоканалу принимается задача ориентации наноспутника на заданный угол по отношению к оси излучения имитатора Солнца. В эксперименте фиксируются положение пятна засветки

от лазерного луча и определяется средняя величина отклонения от целевого направления и СКО. В процессе эксперимента также записываются лог-файлы показаний бортовых датчиков, по которым можно определить время и качество выполнения манёвра.

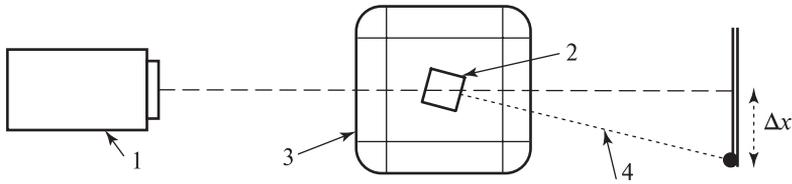


Рис. 5. Схема проведения эксперимента по определению точности ориентации: 1 — имитатор Солнца; 2 — наноспутник; 3 — клетка Гельмгольца; 4 — лазерный луч

Тестирование электромагнитной ориентации СМКА проводилось в магнитном поле клетки Гельмгольца с величиной индукции магнитного поля порядка 150 мкТл. Наноспутник предварительно был сориентирован так, чтобы заданный манёвр развернул СМКА на 180°. Графики зависимости координат единичного вектора направления на Солнце и показаний гироскопа от времени представлены на рис. 6.

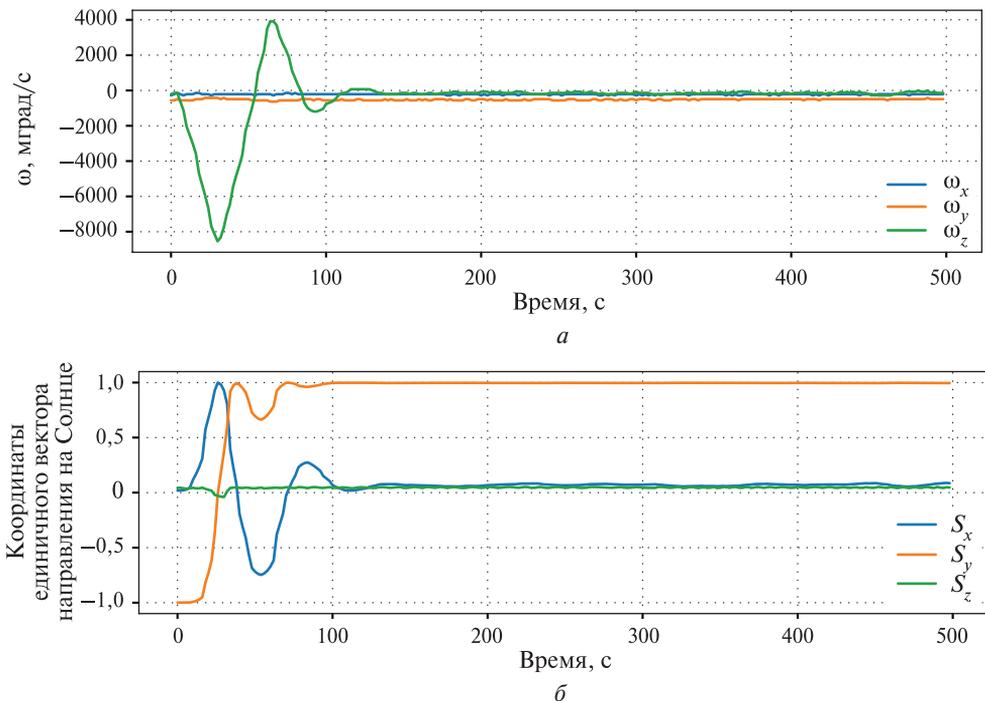


Рис. 6. Графики зависимости от времени при ориентации электромагнитной системой показаний: *а* — гироскопа; *б* — датчиков направления на Солнце

Из графиков видно, что время выполнения манёвра при данных условиях составляет примерно 2 мин. При этом среднее отклонение от цели при удержании заданного угла ориентации составило 7,7°, а СКО — 0,6°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был представлен модуль электромагнитной ориентации наноспутника BSUSat-2 с возможностью выбора пользовательских алгоритмов, математических моделей для подсистемы стабилизации и ориентации. Разработанный функционал системы ориентации поддерживает конфигурирование параметров системы, сохранение мгновенных показаний датчиков и расчётных управляющих моментов и тем самым обеспечивает выполнение научно-образовательной задачи модуля, заключающейся в отработке и варьировании доступных режимов эксплуатации системы ориентации.

В работе был реализован оптический метод оценки качества выполнения пользовательских алгоритмов ориентации макета СМКА при тестировании в наземных условиях с использованием струнного подвеса. Алгоритм ориентации электромагнитными катушками по Солнцу в экспериментальном магнитном поле порядка 150 мкТл для поворота спутника на 180° затратил примерно 2 мин. При этом результирующее средняя ошибка направления при удержании заданной ориентации не превысила величины в 10 угл.град при СКО порядка 1°.

ЛИТЕРАТУРА

- Саечников В. А., Семенович С. Н. Разработка и эксплуатация наноспутника БГУ в качестве учебно-научной лаборатории для обеспечения развития новых направлений в образовании: отчёт о НИР (заключение) / БГУ; рук. В. А. Саечников, С. Н. Семенович. Минск, 2020. 456 с. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/280336>.
- Markley L., Mortari D. How to estimate attitude from vector observations // AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conf. Girdwood, Alaska, 15–19 Aug. 1999. Art. No. AAS 99-427. 18 p.
- Villela Th., Costa C. A., Brandão A. M., Bueno F. T. Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview // Intern. J. Aerospace Engineering. 2019. V. 2019. Art. ID 5063145. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2019/5063145>.

SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL PLATFORM FOR TESTING OF ALGORITHMS AND MODES OF NANOSATELLITE ATTITUDE DETERMINATION AND CONTROL SYSTEM

A. O. Nikalayeu, S. N. Semenovich, I. P. Stetsko

Belarusian State University (BSU), Minsk, Belarus

This paper describes the developed nanosatellite attitude determination and control system, which provides the capability of flight verification various user algorithms and operating modes. The operation mode is configured due to the changeable configuration parameters of the orientation algorithms. The quality and speed of the orientation maneuver is estimated by hardware logging of onboard sensor readings at all stages of algorithm performance. An optical method of ground-based testing of the orientation system in a uniaxial approximation is implemented.

Keywords: nanosatellite, attitude determination and control system, configuration parameters, ground test of attitude determination and control system

Nikalayeu Aliaksey Alehavich — trainee of junior researcher, student, lesha.nikolaev.2000@mail.ru

Semenovich Sergey Nikolaevich — head of the laboratory, candidate of engineering sciences, associate professor

Stetsko Igor Petrovich — head of the laboratory, candidate of engineering sciences, associate professor

ПРИМЕНЕНИЕ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ МУММ К ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СКАНЕРОВ ЦВЕТА И СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ СО СТАНДАРТНЫМ ПРОДУКТОМ И СУДОВЫМИ ДАННЫМИ

М. А. Павлова¹, Д. И. Глуховец^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова (ИО РАН), Москва, Россия

Работа выполнена на основе данных, полученных в экспедициях ИО РАН в Карском море в 2019 и 2021 гг. Цель — улучшение качества спутниковых данных о спектральном коэффициенте яркости моря в видимом диапазоне, концентрации хлорофилла *a* и показателя поглощения жёлтым веществом на длине волны 443 нм, которые могут иметь значительные различия с результатами подспутниковых измерений. Причина возможных ошибок заключается в том, что соответствующие стандартные алгоритмы настроены для вод открытого океана, а Карское море подвержено сильному влиянию речного стока. Поэтому в исследовании применены региональные спутниковые биооптические алгоритмы ИО РАН, учитывающие это влияние. Полученные результаты показывают, что в ряде случаев настроенная атмосферная коррекция MUMM позволяет увеличить точность расчёта коэффициента яркости моря. При этом на точность оценок показателя поглощения жёлтого вещества и концентрации хлорофилла в большей степени влияет выбор биооптических алгоритмов, а не атмосферной коррекции.

Ключевые слова: коэффициент яркости моря, MODIS, атмосферная коррекция, MUMM, региональные биооптические алгоритмы, концентрация хлорофилла *a*, показатель поглощения жёлтого вещества

Выполнено сравнение спектров коэффициента яркости моря, полученных по данным спутниковых сканеров цвета MODIS, с данными, измеренными в 76-м рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море в июле 2019 г. (АМК-76) и в 58-м рейсе НИС «Академик Иоффе» в Карском море в августе 2021 г. (АИ-58). Положение станций, данные которых использовались в работе, показано на рис. 1. Спутниковые данные обрабатывались как с помощью стандартной (STD) атмосферной коррекции (АК), так и с использованием алгоритма MUMM (*англ.* Management Unit of the North Sea Mathematical Models) (Goyens et al., 2013; Ruddick et al., 2000) в среде SeaDAS (<https://seadas.gsfc.nasa.gov>).

Согласно введённым условиям, было выбрано пять спутниковых снимков для исследуемых станций: 3919 (74° 20' 12" с.ш., 67° 41' 37" в.д.) в центральной части Карского моря; 6238 (76° 45' 1" с.ш., 70° 51' 16" в.д.) и 6240 (75° 20' 0" с.ш., 72° 34' 52" в.д.) — вблизи северной оконечности архипелага Новая Земля. С сайта <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> были скачаны продукты сканеров цвета MODIS (*англ.* Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Aqua и Terra уровня L1 для дальнейшей обработки с помощью алгоритма MUMM и продукты уровня L2 (OC, *англ.* ocean color, IOP, *англ.* inherent optical properties) для анализа работы стандартной АК. Натурные измерения коэффициента яркости были получены с помощью плавающего спектрорадиометра (в рейсе АМК-76) и палубного спектрофотометра (в рейсе АИ-58), разработанных

Павлова Мария Александровна — студент бакалавриата, pavlova.ma@phystech.edu

Глуховец Дмитрий Ильич — руководитель лаборатории оптики океана ИО РАН, кандидат физико-математических наук

в Институте океанологии им. П. П. Ширшова (ИО РАН) (Артемьев и др., 2000) и Морском гидрофизическом институте РАН (МГИ) (Ли и др., 2015) соответственно.

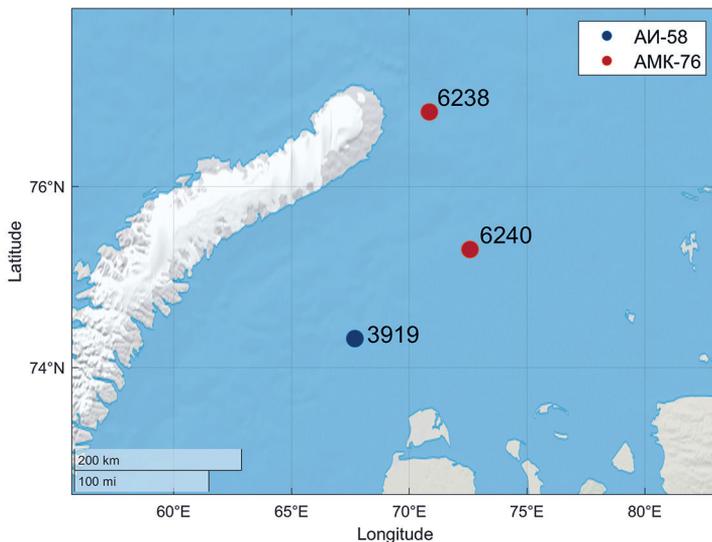


Рис. 1. Карта станций

При анализе контактных и дистанционных данных были введены два критерия качества спутниковых снимков:

- 1) разница во времени между судовыми и спутниковыми измерениями составляет менее 24 ч.
- 2) высота Солнца над горизонтом принимает значение не меньше 20° .

Характерная особенность изучаемого региона — сильное влияние речного стока (Glukhovets, Goldin, 2020), что позволяет отнести исследуемые воды ко второму типу. Высокое содержание окрашенного растворённого органического и взвешенного вещества в областях, подверженных влиянию речного стока, может приводить к значительным ошибкам атмосферной коррекции (Glukhovets et al., 2020).

Для настройки разработанного для вод второго типа алгоритма MUMM использовались три основных калибровочных параметра, которые зависят от значений коэффициентов яркости воды (КП1) и аэрозоля (КП2) в длинноволновых каналах, а также от свойств пропускания компонент атмосферы (КП3). В данном исследовании значение КП1 рассчитано по экстраполированным в ближний инфракрасный (ИК) диапазон натурным данным о коэффициенте яркости моря. КП3 оставался равным рекомендуемому авторами алгоритма значению. Величины КП2 принимали значения от 1 до 1,5.

Также были проведены расчёты значений биооптических характеристик: концентрации хлорофилла a (Chl) и показателя поглощения жёлтым веществом на длине волны 443 нм $a_g(443)$. Расчёты выполнены по региональным алгоритмам (Вазюля и др., 2014; Кузнецова и др., 2013) на основе коэффициентов яркости, полученных с помощью стандартной и настроенной атмосферных коррекций. Важно отметить, что региональный алгоритм для оценки значений $a_g(443)$ не использует первые три канала коэффициента яркости, полученного по данным

сканера цвета MODIS, поскольку в них наблюдаются существенные ошибки, приводящие к неверным количественным оценкам биооптических параметров. Результаты расчётов представлены в таблице.

Результаты работы биооптических алгоритмов после применения различных алгоритмов атмосферной коррекции (GIOP, *англ.* Generalized Inherent Optical Property)

Станция	АК	Chl	$a_g(443)$	Chl	$a_g(443)$	Chl <i>in situ</i>	$a_g(443)$ <i>in situ</i>	<Chl>	< $a_g(443)$ >
3919 01:45	STD	CI/OCx	GIOP	0,89	-0,04	-		-	
		Region	Region	0,31	0,21			0,79	0,17
	MUMM	CI/OCx	-	1,29	-			-	
		Region	Region	0,47	0,41				
6238 13:05	STD	CI/OCx	GIOP	0,36	0,02	0,13	0,035	-	
		Region	Region	0,24	0,04			0,22	0,05
	MUMM	CI/OCx	-	0,37	-			-	
		Region	Region	0,25	0,04				
6240 04:25	STD	CI/OCx	GIOP	2,74	-0,21	0,39	0,661	-	
		Region	Region	0,74	0,46			0,92	0,81
	MUMM	CI/OCx	-	1,9	-			-	
		Region	Region	0,67	0,45				
6240 07:40	STD	CI/OCx	GIOP	3,4	1,13			-	
		Region	Region	0,89	0,84			0,92	0,81
	MUMM	CI/OCx	-	5,86	-			-	
		Region	Region	1,23	0,85				

На рис. 2 представлено пространственное распределение показателя поглощения жёлтым веществом на длине волны 443 нм в результате работы стандартной атмосферной коррекции и регионального алгоритма для станции 3919 АИ-58. Натурные измерения данной характеристики не проводились, поэтому полученное значение $a_g(443) = 0,21 \text{ м}^{-1}$ можно сравнить со среднемесячным показателем $\langle a_g(443) \rangle = 0,17 \text{ м}^{-1}$. Важно отметить, что стандартный алгоритм GIOP в некоторых случаях даёт отрицательные значения $a_g(443)$. При этом региональный алгоритм ИО РАН позволяет получать реалистичные результаты.

В результате сравнения судовых и спутниковых измерений показано:

1. При уменьшении разницы во времени между спутниковым и натурным измерениями результат работы двух рассмотренных моделей атмосферной коррекции улучшается.
2. Для коротковолновых каналов наблюдаются большие ошибки даже в работе настроенной атмосферной коррекции MUMM.
3. Обе атмосферные коррекции позволяют получить реалистичные значения показателя поглощения жёлтого вещества с помощью регионального алгоритма ИО РАН, при этом стандартный алгоритм GIOP даёт отрицательные значения.

Концентрация хлорофилла *a* по результатам работы настроенной атмосферной коррекции и регионального алгоритма для станции 6240 АМК-76 показана

на рис. 3. Полученное значение $\text{Chl} = 0,67 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ сопоставимо с данными натуральных измерений $\text{Chl} = 0,39 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, при этом среднемесячный показатель концентрации хлорофилла значительно выше и составляет $0,92 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$.

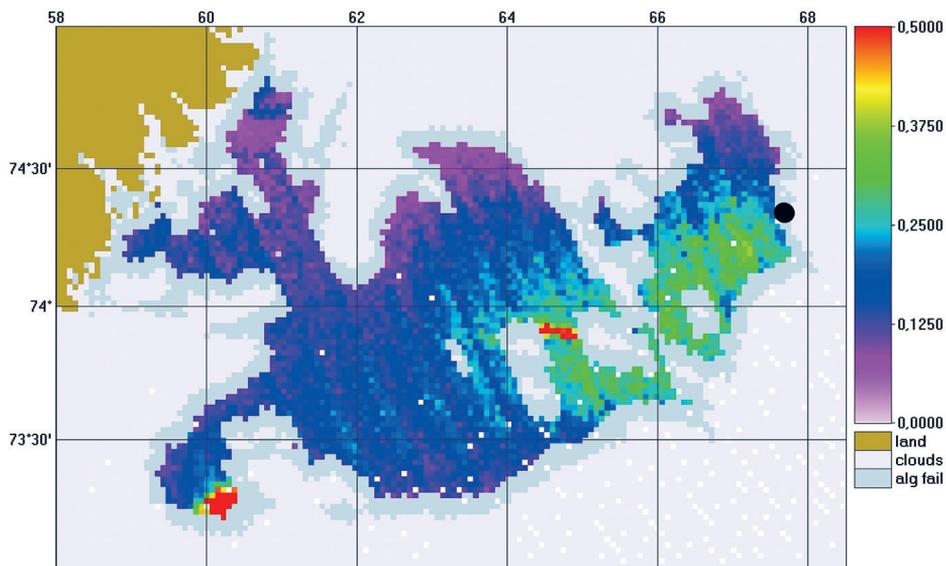


Рис. 2. Пространственное распределение $a_g(443)$ в результате работы стандартной атмосферной коррекции и регионального алгоритма для станции 3919 АИ-58, 01:45 14.08.2021

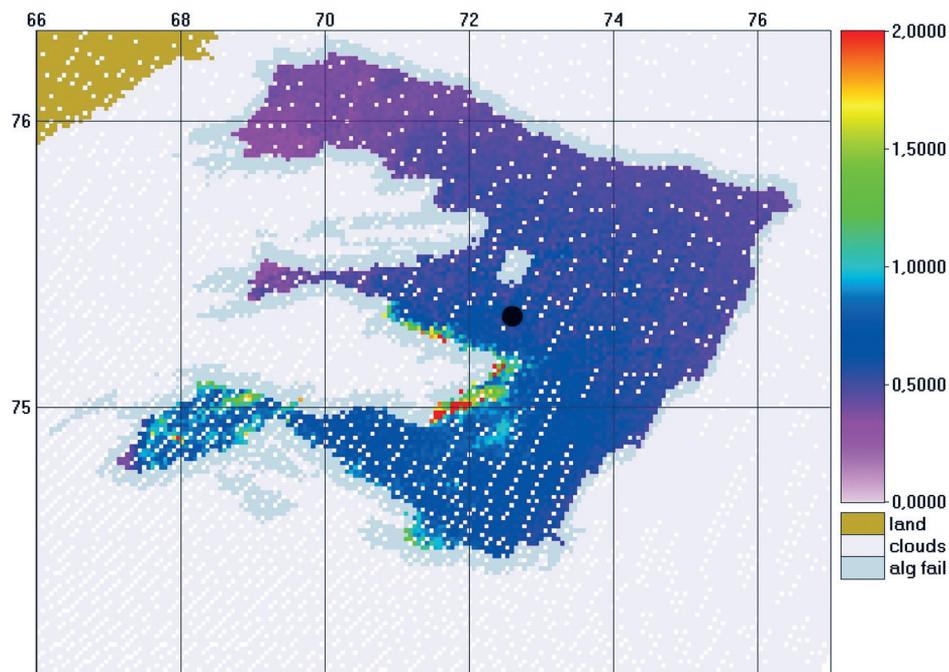


Рис. 3. Пространственное распределение Chl по результатам работы атмосферной коррекции MUMM и регионального алгоритма для станции 6240 АМК-76, 04:25 14.07.2019

Авторы выражают благодарность И. В. Салинг за подбор спутниковых данных, Е. Н. Корчёмкиной, Д. Н. Дерягину, А. Н. Храпко и А. В. Юшмановой за данные судовых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- Артемов В. А., Буренков В. И., Вортман М. И., Григорьев А. В., Копелевич О. В., Храпко А. Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 148–155.
- Вазюля С. В., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Артемов В. А. Оценка по спутниковым данным показателей поглощения окрашенного органического вещества и диффузного ослабления солнечного излучения в водах Белого и Карского морей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 4. С. 31–41.
- Кузнецова О. А., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Буренков В. И., Мошаров С. А., Демидов А. Б. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS Aqua // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 5. С. 21–31.
- Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Корчёмкина Е. Н., Мартынов О. В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофиз. журн.* 2015. № 6(186). С. 17–33.
- Glukhovets D. I., Goldin Yu. A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. V. 62. No. 3. P. 364–373.
- Glukhovets D., Kopelevich O., Yushmanova A., Vazyulya S., Sheberstov S., Karalli P., Sahling I. Evaluation of the CDOM Absorption Coefficient in the Arctic Seas Based on Sentinel-3 OLCI Data // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Iss. 19. Art. No. 3210. 27 p. <https://doi.org/10.3390/rs12193210>.
- Goyens C., Jamet C., Ruddick K. G. Spectral relationships for atmospheric correction. II. Improving NASA's standard and MUMM near infra-red modeling schemes // *Optics Express*. 2013. V. 21. Iss. 18. P. 21176–21187. <https://doi.org/10.1364/OE.21.021176>.
- Ruddick K. G., Ovidio F., Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // *Applied Optics*. 2000. V. 39. Iss. 6. P. 897–912. <https://doi.org/10.1364/AO.39.000897>.

APPLICATION OF MUMM ATMOSPHERIC CORRECTION TO SATELLITE OCEAN COLOR DATA AND COMPARISON OF THE RESULTS OBTAINED WITH THE STANDARD PRODUCT AND SHIPBOARD DATA

М. А. Павлова¹, Д. И. Глуховец^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (MIPT) Dolgoprudny, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology of RAS (IO RAS), Moscow, Russia

The work was carried out on the basis of data obtained during SIO RAS expeditions to the Kara Sea in 2019 and 2021. The goal is to improve the quality of remote sensing data of the spectral reflectance in the visible range, the concentration of chlorophyll *a* and the absorption of CDOM at a wavelength of 443 nm, which may have significant differences with the results of in situ measurements. The reason for possible errors is that the corresponding standard algorithms are configured for the waters of the open ocean, and the Kara Sea is strongly influenced by river runoff. Therefore, the study used regional satellite bio-optical algorithms of SIO RAS, taking into account this influence. The results obtained show that in some cases the adjusted atmospheric

correction MUMM allows to increase the accuracy of calculating the sea reflectance. At the same time, the accuracy of estimates of the absorption of CDOM and chlorophyll *a* concentration is more influenced by the choice of bio-optical algorithms rather than atmospheric correction.

Keywords: remote sensing reflectance, MODIS, atmospheric correction, MUMM, regional bio-optical algorithms, chlorophyll *a* concentration, absorption of CDOM

Pavlova Mariya Aleksandrovna — undergraduate student, pavlova.ma@phystech.edu

Glukhovets Dmitry Ilyich — head of the ocean optics laboratory, IO RAS,
candidate of physical and mathematical sciences

ОБЗОР И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ КРИВЫХ ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

А. В. Радивон^{1,2}, И. В. Зимовец¹

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

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

Надёжное количественное определение кинематических характеристик эруптивных протуберанцев на Солнце важно для понимания их физики, их связи со вспышками и корональными выбросами массы, что необходимо для изучения и прогнозирования космической погоды. В предыдущих работах на основе анализа ультрафиолетовых изображений Солнца по данным SDO/AIA нами были получены зависимости расстояния, скорости и ускорения от времени для нескольких эруптивных событий, но ошибки используемого метода были неудовлетворительно большими. В настоящем исследовании реализовано несколько методов для устранения этой проблемы, в том числе метод сплайнов, метод скользящего среднего и метод регуляризации. Последний позволяет получить аппроксимацию данных нужной гладкости, а также минимизировать ошибки расчётных кинематических кривых. Также был оптимизирован метод построения диаграммы «время – расстояние» по данным SDO/AIA до полуавтоматического метода областей и применён к нескольким эруптивным событиям.

Ключевые слова: солнце, корона, солнечная вспышка, протуберанец, метод регуляризации, диаграмма время-расстояние, экстремальное ультрафиолетовое излучение

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная цель настоящей работы заключается в исследовании возможных связей между энерговыделением во вспышечной области и динамикой протуберанца. В частности, это проверка наличия связи между ускорением протуберанца и энерговыделением, которая наблюдается в некоторых событиях (Bein et al., 2012; Gallagher et al., 2003; Gou et al., 2020; Grechnev et al., 2016; Temmer et al., 2010; Zhang et al., 2001) и предполагается в «стандартной» модели эруптивных вспышек (Lin et al., 2004; Vrsnak, 2008). Для этого необходимо получить релевантные кинематические кривые для эруптивного протуберанца, т. е. зависимости от времени высоты, скорости и ускорения вдоль заданного направления движения.

В предыдущих наших исследованиях были получены зависимости высоты эруптивного протуберанца в области солнечной вспышки от времени на основе данных SDO/AIA (*англ.* Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly) путём прямого накликивания точек в яркой области макушки (рис. 1). В этом способе не учитывалось уширение яркой области макушки с течением времени.

Затем были найдены скорости и ускорения путём численного дифференцирования, поскольку аппроксимировать данные заранее известными функциями не всегда целесообразно, так как вид функции заведомо неизвестен и представ-

Радивон Арина Владимировна — старший лаборант, студентка магистратуры, radivon.av@phystech.edu

Зимовец Иван Викторович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ivanzim@iki.rssi.ru

ляется предметом изучения. Основной проблемой такого подхода выступают большие погрешности, из-за которых выявить настоящее поведение скоростей и ускорений не представлялось возможным. Поэтому основными задачами представленной работы были: полуавтоматизирование метода получения данных зависимости высоты от времени, чтобы учесть ширину яркой области, и нахождение подходящего метода дифференцирования, чтобы получить как можно малые ошибки кинематических кривых.

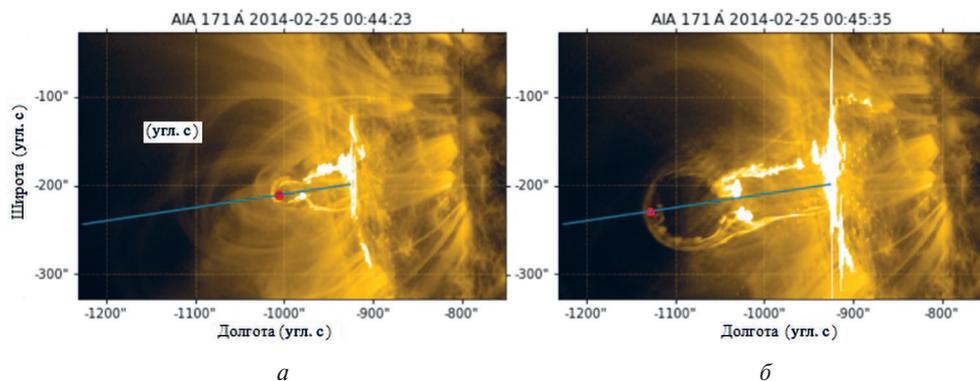


Рис. 1. Иллюстрация предыдущего метода получения диаграммы «время – расстояние» на примере эруптивной вспышки 25.02.2014: *a* — в 00:44:13; *б* — в 00:45:35

МЕТОД ОБЛАСТЕЙ

В новом методе также был построен столбик (срез) через центр движущейся макушки, но теперь двумя точками захватывается вся яркая область на столбике (рис. 2).

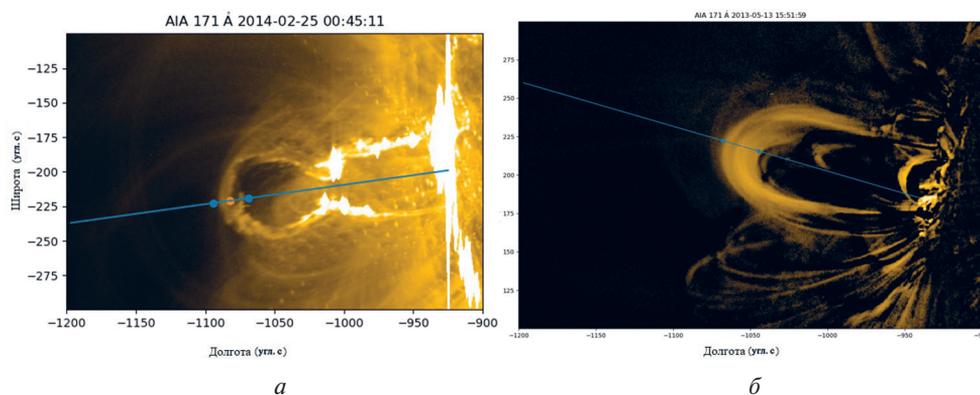


Рис. 2. Иллюстрация метода областей для двух эруптивных вспышек: *a* — 25.02.2014; *б* — 13.05.2013

Центральная точка вычисляется по формуле центра масс, где сумма произведений координат на яркость делится на суммарную яркость, а ошибка вычисляется как среднеквадратичное отклонение от среднего с весами в виде значений яркости.

На основе полученных точек были построены диаграммы «время – расстояние» (рис. 3), а также зависимость высоты от времени, включая ошибки, для двух эруптивных событий: 25.02.2014 и 13.05.2013 (рис. 4). Увеличение ошибок со временем связано как раз с уширением протуберанца.

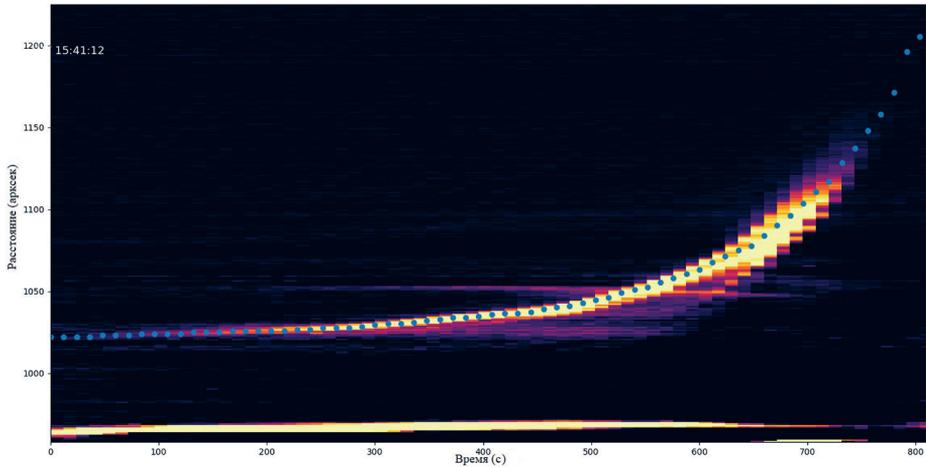


Рис. 3. Диаграмма «время – расстояние» для события 13.05.2013

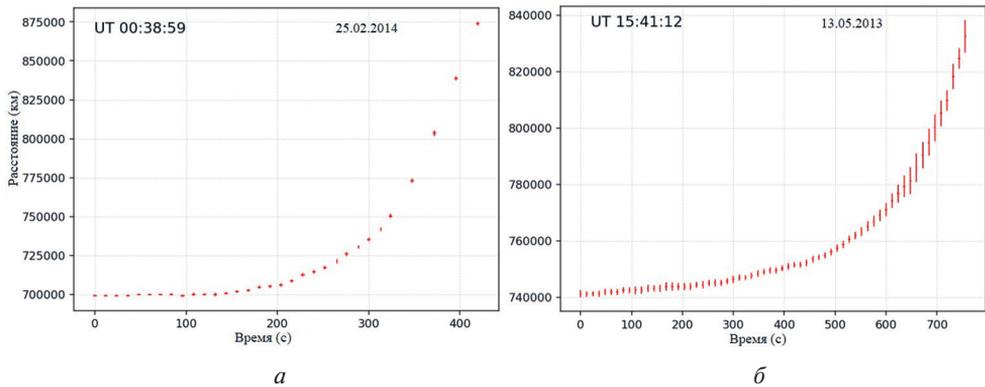


Рис. 4. Зависимости расстояния (высоты) от времени с ошибками, полученные методом областей для событий: *а* – 25.02.2014; *б* – 13.05.2013

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ

Метод сплайнов

Первым применённым методом был метод сплайнов. В нём аппроксимация зависимости высоты от времени строится на заданном количестве точек полиномом заданной степени. То есть при задании N точек каждые N точек будут аппроксимироваться одним и тем же полиномом заданной степени. У этого полинома есть несколько коэффициентов и один из них выбирается так, чтобы сплайн всегда проходил через точки из наших данных. Также можно задавать количество точек, которым будет аппроксимироваться весь набор данных. Далее

по этим точкам проводится численное дифференцирование и находятся скорость и ускорение. В результате применения этого метода функция, аппроксимирующая зависимость высоты от времени, получилась недостаточно гладкой, а ошибки дифференцирования были все ещё большими (сравнимыми с искомыми величинами).

Метод скользящего среднего

Второй часто используемый метод для решения поставленной задачи — метод скользящего среднего. Первоначально для его использования находится среднее по N заданным точкам в каждой точке, а затем строится интерполяционный сплайн. Функция, аппроксимирующая зависимость высоты от времени, получилась более гладкой, чем в методе сплайнов, но ошибки полученных скоростей и ускорений были все ещё велики.

Метод регуляризации

Метод регуляризации был создан А. Н. Тихоновым (1963), а впоследствии авторы работы (Kontar et al., 2004) одними из первых применили его для анализа солнечных рентгеновских спектров тормозного излучения. Он заключается в минимизации функционала $E(u)$:

$$E(\bar{u}) = A\bar{u} - \hat{y}^2 + \alpha D\bar{u}^2.$$

В приведённом функционале: A — матрица численного интегрирования, при домножении вектора производных на которую могут быть получены исходные данные с точностью до одинаковой константы; u — искомый столбец производных; y — значения из данных; α — параметр регуляризации; D — оператор дифференцирования порядка k .

$$\begin{pmatrix} \Delta t & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta t & \dots & \Delta t \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f'(t_0) \\ \dots \\ f'(t_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x_0) \\ \dots \\ f(x_n) \end{pmatrix},$$

где x — время из данных; t — значения временной сетки, в которых определяются производные. Временная сетка данных не всегда эквидистантна, поскольку разница в получаемых данных не всегда 12 с для АИА, а может быть от 8 до 24 с, поэтому на матрицу A необходимо наложить определённые условия:

$$A_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_i \leq t_j, \\ x_i - t_j, & \text{если } t_j < x_i < t_{j+1}, \\ \Delta t, & \text{если } t_{j+1} \leq x_i. \end{cases}$$

Первое слагаемое функционала отвечает за то, чтобы полученная производная хорошо ложилась на данные в пределах ошибки, а второе слагаемое накладывает ограничения, чтобы была получена гладкая, физическая и не рваная функция (Knowles et al., 2014).

$$D^k = \begin{cases} I, & \text{если } k = 0, \\ ID_1^k, & \text{если } k = 1, \\ ID_1^k D_2^k, & \text{если } k = 2. \end{cases}$$

Основная проблема данного метода заключается в подборе параметра регуляризации α . Если он равен нулю, то аппроксимирующая функция проходит через все заданные точки, но совершенно не гладкая, как это было в методе сплайнов. Если параметр стремится к бесконечности, то аппроксимируемая функция будет очень гладкая, но связи с полученными данными не будет. Задача состоит в том, чтобы уравновесить гладкость и прохождение через заданные точки с ошибками. Полагаем, что отличие модели от данных такое же, как ошибки данных. В этом случае не будет слишком сильного попадания в точки с нефизическими осцилляциями, а функция не будет слишком гладкой. Это и есть условие на поиск параметра α (Kontar et al., 2005):

$$A\bar{u} - \hat{y}^2 - \delta y^2 = 0 \text{ или } \frac{A\bar{u} - \hat{y}^2}{\delta y^2} = 1.$$

В теории в идеальном случае частное, указанное в формуле выше, должно равняться единице. Но на практике при значениях частного от 0,3 до 1 аппроксимирующая функция уже даёт достаточную гладкость. Поскольку кривая гладкая, если функция имеет непрерывную производную, то в данной задаче порядок дифференцирования k соответствует трём, так как ускорение — это вторая производная координаты, и оно должно быть гладким.

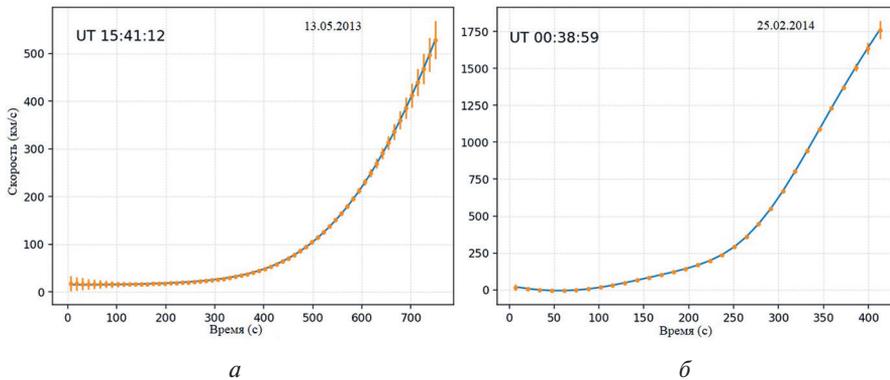


Рис. 5. Зависимости скорости от времени, полученные методом регуляризации с ошибками, обчисленными методом Монте-Карло для событий: *a* — 13.05.2013; *б* — 25.02.2014

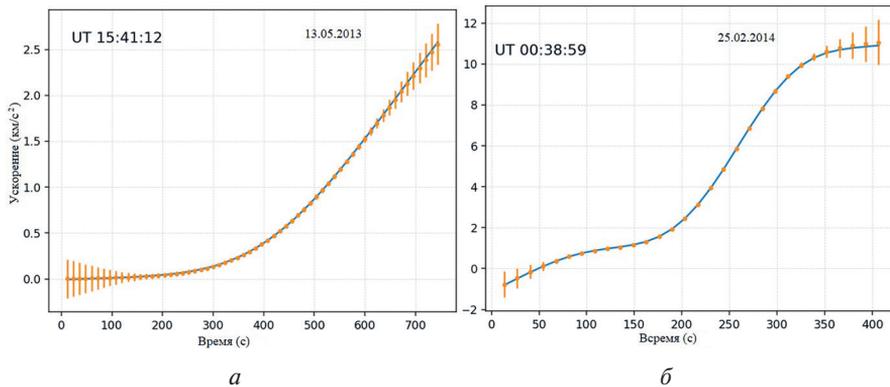


Рис. 6. Зависимости ускорений от времени, полученные методом регуляризации с ошибками, обчисленными методом Монте-Карло для событий: *a* — 13.05.2013; *б* — 25.02.2014

Метод Монте-Карло

Метод регуляризации не обеспечен инструментами для оценки ошибок производных, поэтому для этих целей был использован метод Монте-Карло. Для его применения большое количество раз создается набор точек для высоты в пределах ошибок, полученных методом областей, затем методом регуляризации рассчитывается скорость и ускорение. Ошибка вычисляется из полученного разброса построенных скоростей и ускорений для каждой точки. В результате комбинации двух методов были получены профили скоростей (рис. 5) и ускорений (рис. 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Увеличение ошибок на «хвостах» (рис. 5 и 6) связано с тремя фактами. Во-первых, метод заточен на подбор гладкой функции, и она гладкая там, где находится большинство точек, а на концах осцилляции могут быть больше. Во-вторых, было поставлено условие на непрерывность третьей производной, что накладывает связь на около восьми соседних точек, поэтому на концах связь будет строиться на меньшем количестве точек и ошибка будет больше. И, в-третьих, в самих данных у последних точек ошибки больше, поскольку яркая область расширяется со временем.

По полученному графику ускорение возрастает до 00:46 UT (*англ.* Universal Time) для 25.02.2014, дальше данных AIA нет. По данным GOES (*англ.* Geostationary Operational Environmental Satellite) и RHESSI (*англ.* Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) (рис. 7) пик мягкого рентгена для 25.02.2014 лежит в диапазоне от 00:46 до 00:50 UT. Он может совпадать с пиком ускорения, но это необходимо проверить, добавив к уже имеющимся данным AIA данные с других телескопов с более широким углом обзора.

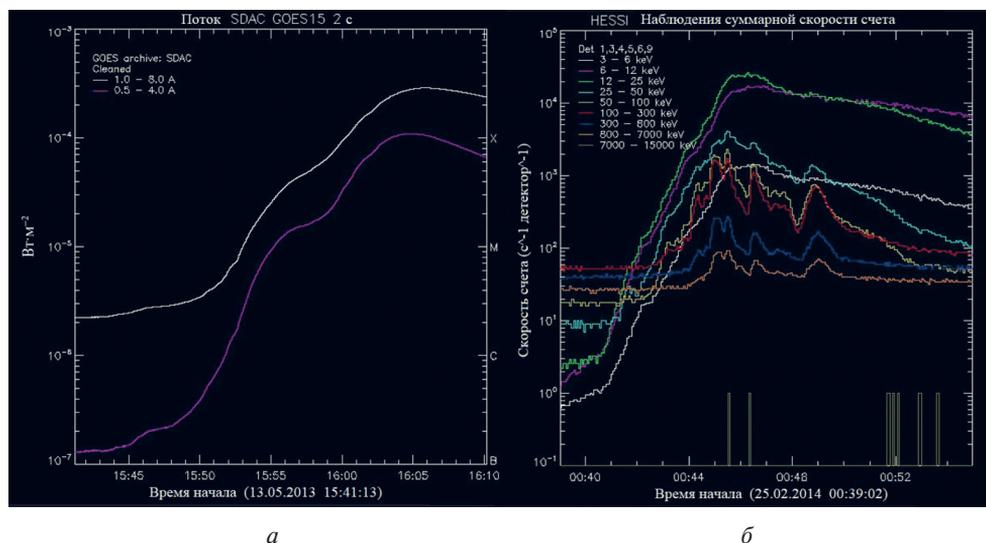


Рис. 7. Данные GOES и RHESSI потоков рентгеновского излучения для событий: а — 13.05.2013; б — 25.02.2014

Для 13.05.2013 пик потока мягкого рентгеновского излучения находится в районе 16:05 UT, что позднее крайнего правого времени на графике ускорения и не противоречит профилю.

Также необходимо было проверить, насколько полученные профили ускорения соответствуют реальным данным, поэтому, два раза проинтегрировав, был получен профиль высоты от времени, который изображён синей линией на рис. 8.

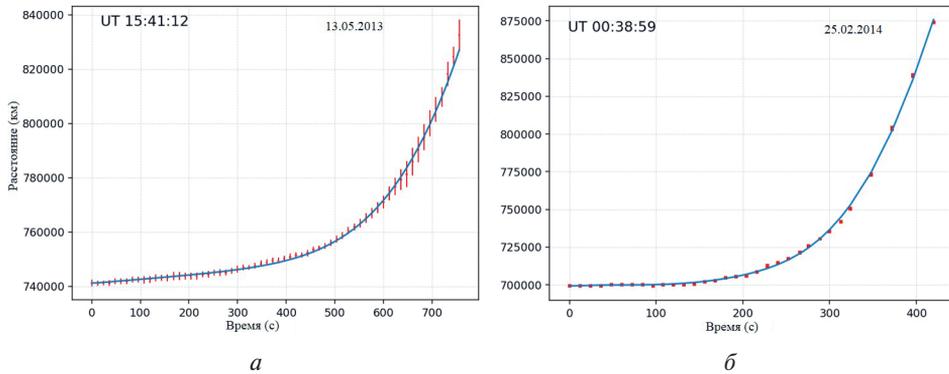


Рис. 8. Зависимости расстояния (высоты) от времени, полученные двойным интегрированием профилей ускорения, полученных методом регуляризации для событий: *a* — 13.05.2013; *б* — 25.02.2014

Красными точками показаны начальные данные с ошибками. Как можно видеть, профиль, полученный методом регуляризации (сплошные кривые), довольно хорошо ложится на исходные данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе был разработан метод с использованием регуляризации для исследования кинематики эруптивных протуберанцев на основе анализа данных наблюдений SDO/AIA в экстремальном ультрафиолетовом излучении. Метод применён к анализу двух мощных эруптивных вспышек (13.05.2013 и 25.02.2014) и для них получены профили скоростей и ускорений. Также получен предварительный результат: возможна связь максимума ускорения и максимума мягкого рентгеновского излучения. В дальнейшем планируется развитие метода, расширение анализа на большее число событий, учёт данных с других телескопов с большим полем зрения для исследуемых событий.

ЛИТЕРАТУРА

- Тихонов А. Н.* О регуляризации некорректно поставленных задач // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153. № 1. С. 49–52.
- Bein B. M., Berkebile-Stoiser S., Veronig A. M., Temmer M., Vršnak B.* Impulsive Acceleration of Coronal Mass Ejections. II. Relation to Soft X-Ray Flares and Filament Eruptions // The Astrophysical J. 2012. V. 755. Iss. 1. Art. Id. 44. 12 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/755/1/44>.
- Gallagher P. T., Lawrence G. R., Dennis B. R.* Rapid Acceleration of a Coronal Mass Ejection in the Low Corona and Implications for Propagation // The Astrophysical J. 2003. V. 588. No. 1. Art. Id. 588. P. L53–L56. <https://doi.org/10.1086/375504>.

- Gou T.* Solar Flare-CME Coupling throughout Two Acceleration Phases of a Fast CME // *The Astrophysical J.* 2020. V. 897. No. 2. Art. Id. L36. 9 p. DOI: 10.3847/2041-8213/ab9ec5.
- Grechnev V. V.* A Tiny Eruptive Filament as a Flux-Rope Progenitor and Driver of a Large-Scale CME and Wave // *Solar Physics.* 2016. V. 291. No. 4. P. 1173–1208, DOI: 10.1007/s11207-016-0888-z.
- Knowles I., Renka R. J.* Methods for numerical differentiation of noisy data // *Electronic J. Differential Equations. Conference 21.* 2014. P. 235–246.
- Kontar E. P., Piana M., Massone A. M., Emslie A. G., Brown J. C.* Generalized Regularization Techniques with Constraints for the Analysis of Solar Bremsstrahlung X-ray Spectra // *Solar Physics.* 2004. V. 225. P. 293–309.
- Kontar E. P., MacKinnon A. L.* Regularized Energy-Dependent Solar Flare Hard X-Ray Spectral Index // *Solar Physics.* 2005., V. 227. P. 299–310.
- Lin J.* CME-Flare Association Deduced from Catastrophic Model of CMEs // *Solar Physics.* 2004. V. 219. No. 1. P. 169–196. DOI: 10.1023/B:SOLA.0000021798.46677.16.
- Temmer M., Veronig A. M., Kontar E. P., Krucker S., Vršnak B.* Combined STEREO/RHESSI Study of Coronal Mass Ejection Acceleration and Particle Acceleration in Solar Flares // *The Astrophysical J.* 2010. V. 712. No. 2. P. 1410–1420. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/712/2/1410>.
- Vršnak B.* Processes and mechanisms governing the initiation and propagation of CMEs // *Anales Geophysicae.* 2008. V. 26. No. 10. P. 3089–3101. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-3089-2008>.
- Zhang J., Dere K. P., Howard R. A., Kundu M. R., White S. M.* On the Temporal Relationship between Coronal Mass Ejections and Flares // *The Astrophysical J.* 2001. V. 559. No. 1. P. 452–462. <https://doi.org/10.1086/322405>.

REVIEW AND IMPLEMENTATION OF DATA APPROXIMATION METHODS FOR OBTAINING KINEMATIC CURVES OF AN ERUPTIVE PROMINENCE

A. V. Radivon^{1,2}, *I. V. Zimovets*¹

¹ Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

Reliable quantitative determination of the kinematic characteristics of eruptive prominences on the Sun is important for understanding their physics, their relationship with flares and coronal mass ejections (CMEs), which is necessary for studying and predicting space weather. In previous works, based on the analysis of solar ultraviolet images from SDO/AIA data, we obtained the time dependencies of distance, velocity, and acceleration for several eruptive events, but the errors of the method used were unsatisfactorily large. In this research, several methods were created to solve this problem, including the spline method, the moving average method, and the regularization method. The latter makes it possible to obtain an approximation of the data of the desired smoothness, as well as to minimize the errors in the calculated kinematic curves. The time-distance diagram plotting method from SDO/AIA data has also been optimized to a semi-automatic area method and applied to several eruptive events.

Keywords: sun, corona, solar flare, eruptive prominence, extreme ultraviolet, regularization method, time-distance diagram

Radivon Arina Vladimirovna — senior laboratory assistant, graduate student, radivon.av@phystech.edu

Zimovets Ivan Victorovich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences, ivanzim@iki.rssi.ru

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКА СИГНАЛА НА ТЕЛЕСКОПАХ TAIGA-IACT

А. Ю. Разумов от коллаборации TAIGA

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

Атмосферные черенковские телескопы выступают мощным инструментом гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Астрофизический комплекс TAIGA (Тункинская долина, Республика Бурятия) включает в себя три (с апреля 2022 г.) атмосферных черенковских телескопа TAIGA-IACT, и в ближайшей перспективе их число будет увеличено до пяти. Описывается методика поиска сигнала от астрофизических источников гамма-квантов сверхвысоких энергий (более 1 ТэВ) по данным наблюдений источника HAWC J2019+368 Dragonfly Nebula в созвездии Лебедь за 2020–2021 гг. Источник представляет собой пульсарную туманность (PWN) со спектром энергий гамма-квантов, простирающимся дальше 100 ТэВ. Приведён обзор источника и методов обработки данных моделирования и экспериментальных данных. За 2020 г. по результатам обработки 40 ч совместных наблюдений двух атмосферных черенковских телескопов, выделен сигнал с уровнем значимости в 3σ с возможным улучшением обработки методами машинного обучения.

Ключевые слова: наземная гамма-астрономия, космические лучи, черенковское излучение, астрофизика высоких энергий

ВВЕДЕНИЕ

Тункинский астрофизический комплекс, в состав которого входит гамма-обсерватория TAIGA (*англ.* Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy), нацелен на решение широкого круга задач в области изучения космических лучей и верхних пределов энергетического спектра астрофизических гамма-квантов, располагается в Тункинской долине на высоте 675 м над уровнем моря. С 2013 г. ведётся строительство обсерватории TAIGA, в состав которой входят три (с апреля 2022 г.) атмосферных черенковских телескопа TAIGA-IACT (*англ.* Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope), 120 широкоугольных оптических станций TAIGA-HiSCORE (*англ.* High Sensivity Cosmic Rays and gamma Explorer), а также сцинтилляционная установка TAIGA-Muon. Обсерватория расположена на площади $1,1 \text{ км}^2$; три телескопа TAIGA-IACT образуют треугольник со сторонами 300, 400 и 500 м (рис. 1) (Астапов и др., 2022).

TAIGA-IACT представляет собой атмосферный черенковский телескоп с альт-азимутальной подвижной платформой и параболическим отражателем с диаметром

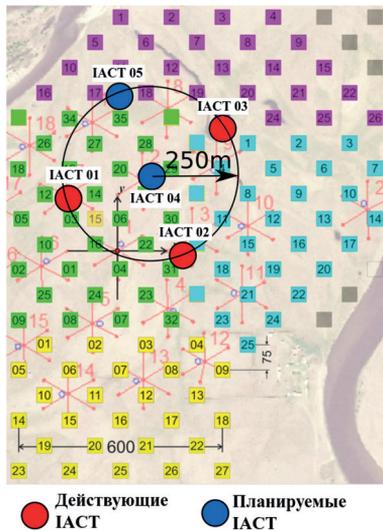


Рис. 1. Размещение черенковских телескопов TAIGA-IACT

Разумов Александр Юрьевич — ведущий программист, студент магистратуры, alex.razumov98@gmail.com

4,3 м. Отражатель состоит из сферических зеркал и имеет общую площадь поверхности $9,6 \text{ м}^2$. Фокусное расстояние отражателя составляет 4,75 м, в фокальной плоскости на штангах размещена регистрирующая камера с электроникой и ФЭУ (фотоэлектронные умножители). С апреля 2022 г. комплекс TAIGA включает в себя три телескопа TAIGA-IACT (IACT01, IACT02, IACT03), камеры каждого из которых имеют диаметр угла обзора $9,6^\circ$. Матрицы камер состоят из 560, 600 и 600 пикселей ФЭУ XP1911 соответственно, расположенных в шестигранной сетке. Угловой размер каждого пикселя составляет $0,36^\circ$. Пиксели сгруппированы в 22 кластера: центральные кластеры состоят из 28 пикселей, периферийные — из 21 и 14.

ИССЛЕДУЕМЫЙ ИСТОЧНИК

Выбранный источник HAWC (*англ.* High Altitude Water Cherenkov experiment — Высокогорный эксперимент по поиску эффекта Черенкова) J2019+368 в туманности Dragonfly — самый яркий гамма-источник в созвездии Лебедь (*лат.* Cygnus). Обнаружен обсерваторией Milagro, изучался проектами MAGIC (*англ.* Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescopes), VERITAS (*англ.* Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System), HAWC (*англ.* High-Altitude Water Cherenkov Observatory). На TAIGA источник изучался методом черенковских атмосферных телескопов впервые. Представляет собой туманность пульсарного ветра (*англ.* Pulsar Wind Nebula, PWN), ассоциированную с пульсаром PSR J2021+3651 (период пульсаций 104 мс).

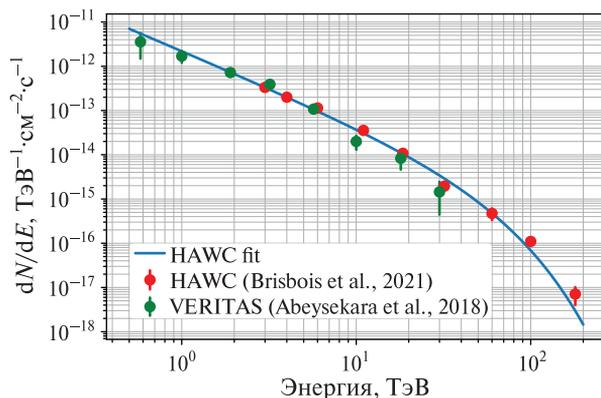


Рис. 2. Спектр источника в туманности Dragonfly по данным HAWC и VERITAS. Синей линией показана аппроксимация данных

По данным обсерватории HAWC (Albert et al., 2021) был составлен спектр источника (рис. 2), простирающийся выше 100 ТэВ. Является кандидатом в галактические ускорители частиц до энергий свыше 10^{15} эВ (Mitchell, 2021).

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

При прохождении через атмосферу частицы высокой энергии (адрона или гамма-кванта с $E > 10^{11}$ эВ) начинается каскадный процесс рождения вторичных частиц, называемый широким атмосферным ливнем. В адронном случае основными

вторичными частицами выступают электроны и мюоны, образующиеся из распада заряженных пионов. В гамма-событиях мюоны возникают значительно реже. Релятивистские частицы, преодолев порог, вызывают черенковское излучение в атмосфере. Свет, попадая на сферическое зеркало IACT, фокусируется в регистрирующей камере. При формировании триггера записывается набор амплитуд сигналов с ФЭУ в кодах амплитудно-цифрового преобразователя. Значения переводятся в соответствующее заранее проведённым калибровкам число фотоэлектронов. Полученные «изображения» подвергаются процедуре очистки. Пиксель учитывается в изображении, если удовлетворяет двум условиям:

- амплитуда пикселя превышает заданную величину A ;
- имеется хотя бы один соседний пиксель, превышающий величину B .

Изображение аппроксимируется эллипсом, обладающим набором параметров: ширина — $width$, длина — $length$, уравнение главной оси — $y = ax + b$ (где x и y — координаты в камере; a и b — коэффициенты уравнения прямой) и др. Этот подход был предложен А. М. Хилласом (*англ.* A. M. Hillas) для обработки данных телескопа обсерватории Фреда Лоуренса Уиппла (*англ.* Fred Lawrence Whipple). Основной проблемой выделения гамма-сигнала в данных представляется колоссальное количество событий, вызванных широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) от адронов. Для подавления адронного фона используется разделение изображений по параметрам Хилласа. События, эллипсы изображений которых ориентированы на источник, рассматриваются как кандидаты в гамма-события и называются ON-событиями. Идея выделения состоит в поиске избытка ON-событий относительно некоторой другой точки (или точек) в камере. События, эллипсы изображений которых ориентированы на такие «источники» фоновых событий, называются OFF-событиями. Значимость избытка считается по формуле авторов работы (Li, Ma., 1983):

$$S = \frac{N_{ON} - \alpha N_{OFF}}{\sqrt{N_{ON} + \alpha^2 N_{OFF}}}. \quad (1)$$

Здесь N_{ON} , N_{OFF} — соответствующие количества ON- и OFF-событий; α — отношение числа каналов ON-событий к числу каналов OFF-событий, т. е. к количеству фоновых «источников».

Положение источника в камере смещено относительно центра на $1,2^\circ$, каждые 20 мин телескоп перемещает камеру так, что источник оказывается в диаметрально противоположной точке. Эта методика называется вобблинг-методикой (*англ.* wobbling) и используется для равномерного набора статистики кластерами регистрирующей камеры, подавляя вклад кластеров и пикселей с неисправностями.

Обработка полученных данных может вестись в одном из трёх режимов: моноскопическом, гибридном и стереоскопическом.

В моноскопическом режиме рассчитывается угол α между направлением главной оси эллипса и направлением на источник (фоновый «антиисточник»). Наличие избытка в диапазоне значений $0-10^\circ$ позволяет утверждать наличие сигнала. К 2021 г. получен избыток со значимостью $6,3\sigma$ по 42 ч наблюдений Крабовидной туманности на телескопе IACT01 (Sveshnikova et al., 2021).

В гибридном режиме обработка данных черенковского телескопа ведётся совместно с данными массива широкоугольных оптических станций TAIGA-NiSCORE. По данным NiSCORE восстанавливается направление оси прихода ливня и энергия частицы. Около 5 % событий, зарегистрированных массивом, наблюдаются также и на установках IACT, поэтому для исследования области

энергий выше 50 ТэВ планируется использование малых широкоугольных черенковских телескопов с эффективной площадью 1 м^2 . В настоящее время используется прототип такого телескопа — SIT (*англ.* Small Imaging Telescope).

В стереоскопическом режиме ведётся отбор событий, совместно наблюдавшихся двумя (или больше) телескопами в окне совпадения 2 мкс. Из рассмотрения исключаются временные интервалы, совместный темп счёта которых ниже 1 Гц. Затем изображения приводятся к одной камере путём совмещения положений источника. Пересечение главных осей эллипсов, заданных уравнениями $y = a_1x + b_1$ и $y = a_2x + b_2$ находится как

$$x = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}, \quad y = a_1x + b_1.$$

Аналогично восстанавливается положение оси ШАЛ, коэффициенты главных осей рассчитываются с учётом положения телескопов на плоскости. Между положением источника и восстановленным углом прихода ШАЛ есть угол θ , который можно интерпретировать как ошибку восстановления положения источника в камере.

Изображения от ШАЛ, вызванных адроном, должны быть шире, чем от γ -квантов, так как поперечное сечение «адронного» ливня шире. Вводится масштабированный параметр N_{width} нормализованной ширины, описывающий ширину события, нормированную на размеры изображений в фотоэлектронах с разных камер с разными весами:

$$N_{width} = \frac{1}{N_{trig}} \left[\sum_i^{N_{trig}} \frac{width_i - w_m(r_i, siz_i)}{w_{MAD}(r_i, siz_i)} \right],$$

где w_{ith}_i — ширина (параметр Хилласа) i -го изображения; siz_i — размер изображения в фотоэлектронах; r_i — расстояние от восстановленной оси ливня до i -го телескопа, зарегистрировавшего событие; $w_m(r_i, siz_i)$ — медианное значение параметра $width$ для событий с величиной siz_i на i -м телескопе и с расстоянием r_i от восстановленной оси ливня до i -го телескопа; $w_{MAD}(r_i, siz_i)$ — медианное абсолютное отклонение, полученное из распределения $width$ для данного расстояния r_i до оси ШАЛ и для данной величины события siz_i .

Параметры w_m и w_{MAD} получаются по результатам моделирования Монте-Карло, о котором речь пойдёт ниже.

Введение порогов на величину изображения в фотоэлектронах (сайз), на величину угла θ между восстановленной осью ШАЛ и направлением на источник и на нормализованную ширину позволяет сильно подавить адронный фон и обнаружить избыток ON-событий.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Для оценки возможностей астрофизического комплекса TAIGA по регистрации того или иного источника гамма-квантов ведётся моделирование ШАЛ методом Монте-Карло. Используется комплекс CORSIKA с моделью взаимодействий GHEISHA-2002d при низких энергиях и моделью взаимодействий QGSJET-II-04 при высоких энергиях.

Во входных файлах задаются позиции пяти черенковских телескопов, из которых три (IACT01, IACT02, IACT03) уже функционируют, запуск ещё двух (IACT04, IACT05) запланирован на ближайшие несколько лет. По результатам моделирования есть ливни от первичных γ -квантов с $E = 1\text{--}50$ ТэВ и протонов с $E = 40\text{--}100$ ТэВ, разыгранные на площади 3 км^2 . Спектры первичных частиц

степенные с показателем наклона $\Gamma = -1$. Используются как частицы с зенитными углами прихода $30\text{--}40^\circ$ (соответствующие зенитным углам Крабовидной туманности при наблюдении в Тункинской долине), так и частицы, приходящие под углами $0\text{--}30^\circ$ и вызывающими квазивертикальный ливень. Данные выводов CORSIKA по фотонам подаются на вход программе, моделирующей оптическую систему телескопов TAIGA-IACT. Выводом этой программы становится файл события с амплитудами отдельных пикселей в фотоэлектронах, как если бы событие с реальными триггера IACT прошло первичную обработку данных.

Энергетический диапазон γ -квантов $1\text{--}50$ ТэВ разбивается на интервалы по 5 ТэВ. Для каждого интервала находится доля γ -событий от общего числа, зарегистрированных одновременно на IACT01 и IACT02. Помноженная на площадь 3 км^2 , эта доля даёт эффективную площадь стереоскопических наблюдений S_{eff} (рис. 3). Из рассмотрения исключаются события, прошедшие триггер, но содержащие граничные пиксели камеры, так как анализ и обработка таких изображений представляет более сложную задачу, таким образом, высокоэнергичные события при почти гарантированном наличии граничных пикселей, приводят кривую эффективной площади к насыщению. Количество частиц от источника со спектром $J(E)$ за время τ можно оценить по формуле:

$$N = \int J(E)S_{eff}(E)\tau \approx \sum J_i S_i \tau.$$

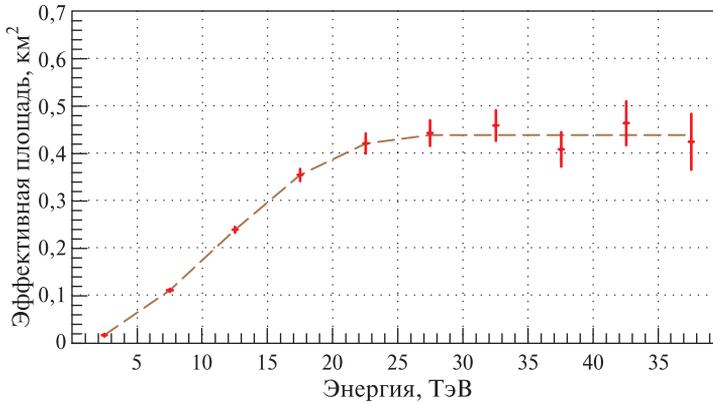


Рис. 3. Эффективная площадь комплекса при работе первых двух телескопов

Таким образом, за 100 ч наблюдения системой из телескопов можно зарегистрировать не более 100 событий в диапазоне $10\text{--}20$ ТэВ и не более 40, 20, 10 событий в диапазонах $20\text{--}30$, $30\text{--}40$ и $40\text{--}50$ ТэВ соответственно. С появлением IACT03 эти числа возрастут приблизительно в три раза.

Здесь не учтены пороги на обозначенные ранее параметры разделения, которые также можно получить методом Монте-Карло.

Для сбалансированной выборки гамма-квантов и адронных событий построены распределения θ^2 (рис. 4), из которых видно, что адронные события распределены по этому параметру равномерно, а число гамма-событий, для которых неверно восстановлено положение источника, падает с ростом ошибки. Отбор событий внутри круга радиусом $0,2^\circ$ приводит к подавлению (Grinyuk et al., 2021) числа гамма-событий в два раза, а протонных — в 2000 раз.

Так как ШАЛ от гамма-квантов имеют меньшее поперечное сечение, чем от адронов, нормализованная ширина гамма-событий должна быть в среднем меньше нормализованной ширины протонных событий, что продемонстрировано на (рис. 5).

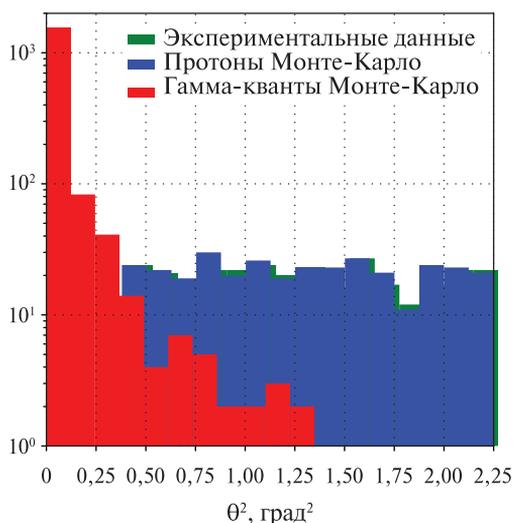


Рис. 4. Распределение событий по квадрату угла θ^2

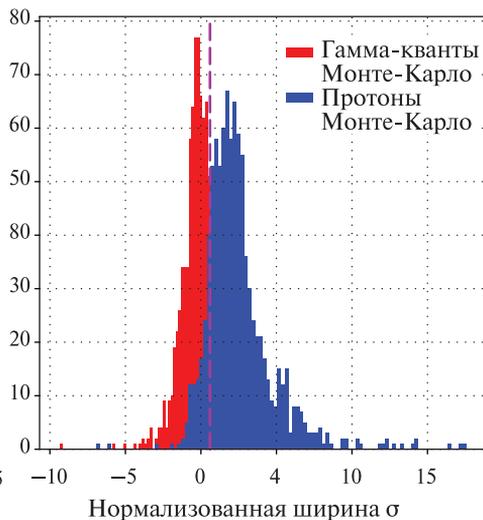


Рис. 5. Распределение событий по нормализованной ширине σ

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В таблице указаны имеющиеся экспериментальные данные по наблюдению источника HAWC J2018+368 в туманности Dragonfly двумя телескопами IACT01 и IACT02.

Экспериментальные данные по наблюдению HAWC J2019+368

Телескоп	Август – декабрь	
	2020 г.	2021 г.
IACT01, ч	52	29
IACT02, ч	54	28
Совместное наблюдение:		
• малые зенитные углы, ч	22	
• большие зенитные углы, ч	18	

Выборка была разделена на события с малыми зенитными углами и события с большими зенитными углами. Введён порог на темп совместной регистрации не менее 1 Гц, а также на сайт. В случае квазивертикальных событий был введён порог на совместный сайт не менее 150 фотоэлектронов, для больших зенитных углов — на сайт изображения с каждого телескопа не менее 150.

После этого были отобраны ON- и OFF-события. В роли OFF-источников выступили пять точек, расположенных на том же удалении от центра камеры, что и реальный источник, со смещениями по дуге в 120, 150, 180, 210, 240°. Таким образом, параметр α из формулы (1) равен 0,2.

На рис. 6 представлено распределение нормализованной ширины отобранных ON- и OFF-событий. Для малых зенитных углов был выбран порог со значением $N_{width} = 0,6\sigma$, после применения которого осталось 66 ON-событий и 38 OFF-событий (в среднем по пяти фоновым точкам). Этот избыток соответствует значимости в 3,26 σ за 22 ч наблюдения.

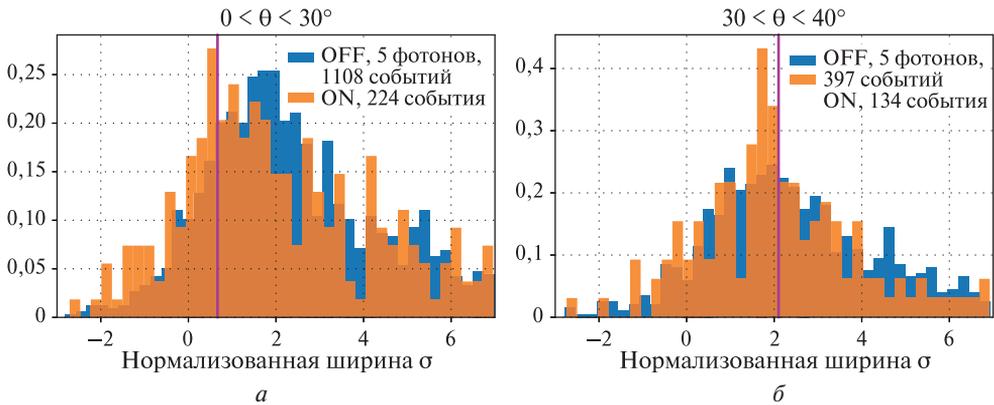


Рис. 6. Распределение нормализованной ширины отобранных событий: *a* — с малыми зенитными углами; *b* — с большими зенитными углами

Выборка с большими зенитными углами отличается порогами от предыдущего случая, так как ливень от гамма-кванта распространяется под большим углом к горизонту, и частицы проходят большее расстояние. Поскольку в этом случае увеличивается длина пути, зарегистрированы будут ливни с большой энергией, поэтому необходимо повысить порог сайза на обоих телескопах. Был введён порог на сайз каждого изображения не меньше 150 фотоэлектронов. Отбор OFF-событий также проходил по пяти точкам «источников» фона.

При выборе порога $N_{width} = 2,12\sigma$ отбирается 78 ON-событий и 62 OFF-события, что соответствует значимости $1,36\sigma$ по 18 ч наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разделении событий по найденным с помощью симуляции Монте-Карло порогам для параметров суммарно по двум выборкам остаётся 144 ON-события и 100 OFF-событий по пяти фоновым точкам, это соответствует значимости $3,37\sigma$ за 40 ч наблюдения, основной вклад в которую вносят 22 ч наблюдения при малых зенитных углах.

Результаты могут быть в перспективе быть улучшены следующими способами:

1. Набор новой статистики в сезоне 2022 г. уже тремя регистрирующими камерами TAIGA-IACT.
2. Использование гибридного подхода TAIGA для событий с энергией больше 40 ТэВ.
3. Введение новых параметров разделения на основе оценок восстановленной энергии и глубины максимума развития ливня.
4. Обработка неучтённых данных в моноскопическом режиме.
5. Привлечение алгоритмов машинного обучения.

Развивается подход с использованием алгоритмов классического машинного и глубокого обучения для решения задачи классификации событий. Одним из зарекомендовавших себя алгоритмов представляется модель случайного леса, основанная на совокупности множества решающих деревьев (Albert et al., 2007).

ЛИТЕРАТУРА

- Астапов И. И. и коллаборация TAIGA* Изучение космических лучей на астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы // Журн. эксперим. и теорет. физики., 2022. Т. 161. Вып 4. С. 548–559. DOI: 10.31857/S0044451022040095.
- Sveshnikova L. G. и коллаборация TAIGA* Detecting Gamma Rays with Energies Greater than 3–4 TeV from the Crab Nebula and Blazar Markarian 421 by Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes in the TAIGA Experiment // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2021. V. 85. No. 4. P. 398–401.
- Albert A. et al.* Spectrum and Morphology of the Very-high-energy Source HAWC J2019+368 // The Astrophysical J. 2021. V. 911. No. 2. Art. No. 143.
- Albert J. et al.* Implementation of the random forest method for the imaging atmospheric Cherenkov telescope MAGIC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2008. V. 588. Iss. 3. P. 424–432. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.11.068>.
- Grinyuk A. and TAIGA collaboration* Stereoscopic and monoscopic operation of the five IACTs in the TAIGA experiment // Proceeding of Science ICRC2021. 2021. Art. No. 713. 9 p. DOI: 10.22323/1.395.0713.
- Mitchell A. M. W.* Status of Ground-based and Galactic Gamma-ray Astronomy // arXiv preprint. 2021. 24 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.13753>.
- Li T.-P., Ma Y.-Q.* Analysis methods for results in gamma-ray astronomy // The Astrophysical J. 1983. V. 272. P. 317–324. DOI: 10.1086/161295.

КОЛЛАБОРАЦИЯ TAIGA

И. И. Астапов¹, П. А. Безьязыков², Е. А. Бонвеч³, А. Н. Бородин⁴, Н. М. Буднев², А. Булан³, А. Вайдянатан⁵, П. Волков⁵, П. Волчугов³, Д. Воронин⁶, А. Р. Гафаров², О. А. Гресс², Т. И. Гресс², О. Г. Гришин², А. Ю. Гармаш^{5,7}, В. М. Гребенюк^{4,8}, А. А. Гринюк⁴, А. Н. Дячок², Д. П. Журов², А. В. Загородников², А. Л. Иванова², Н. Н. Калмыков³, В. В. Киндин¹, С. Н. Кирюхин², Р. П. Кокоулин¹, К. Г. Компаниец¹, Е. Е. Коростелева³, В. А. Кожин³, Е. А. Кравченко⁵, А. П. Крюков³, Л. А. Кузьмичев³, А. Кьявасса⁹, А. А. Лагутин¹⁰, М. В. Лаврова⁴, Ю. Е. Лемешев², Б. К. Лубсандоржиев⁶, Н. Б. Лубсандоржиев³, Р. Р. Миргазов², Р. Д. Монхоев², Э. А. Окунева¹, Э. А. Осипова³, А. Л. Пахоруков², А. Пан⁴, Л. В. Паньков², А. А. Петрухин¹, Д. А. Подгрудков³, В. А. Полешук², Е. Г. Попова³, Е. Б. Постников³, В. В. Просин³, В. С. Птускин¹¹, А. А. Пушкин², Р. И. Райкин¹⁰, А. Ю. Разумов³, Г. И. Рубцов⁶, Е. В. Рябов², Я. И. Сагань⁴, В. С. Самолига², А. А. Силаев³, А. А. Силаев (мл.)³, А. Ю. Сидоренков⁶, А. В. Скурихин³, А. В. Соколов^{5,7}, Л. Г. Свешникова³, Я. В. Суворкин², В. А. Таболенко², А. Б. Танаев³, Б. А. Тарашанский², М. Ю. Терновой², Л. Г. Ткачев^{4,8}, Н. А. Ушаков⁶, Д. В. Чернов³, И. И. Яшин¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт прикладной физики
Иркутского университета (НИИПФ ИГУ), Иркутск, Россия

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д. В. Скобелыцына Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

⁴ Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия

⁵ Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск, Россия

⁶ Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), Москва, Россия

⁷ Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН)
Новосибирск, Россия

⁸ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

⁹ Туринский университет, Турин, Италия

¹⁰ Алтайский государственный университет (АлтГУ), Барнаул, Россия

¹¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия

STEREOSCOPIC SIGNAL SEARCH WITH TAIGA-IACT

A. Yu. Razumov and TAIGA collaboration

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs) are powerful tools for ground-based ultra-high-energy gamma-astronomy. The TAIGA Astrophysical Complex (Tunka Valley, Republic of Buryatia, Russia) includes three IACTs (since April 2022) and their number will be increased to five in the near future. In this paper the method for signal searching from astrophysical sources of ultrahigh-energy (above 1 TeV) based on observations 2020--2021 of the source HAWC J2019+368 in the Dragonfly Nebula is described. The source is a pulsar wind nebula (PWN) with gamma-ray energy spectrum extending beyond 100 TeV. An overview of the source and methods of simulation and experimental data is given. For 2020–2021 runs, based on the results of processing 40 hours of joint observations of IACT01 and IACT02, a signal with significance level of 3σ was identified and a possible improvement was suggested using processing by machine learning methods.

Keywords: ground-based gamma-astronomy, cosmic rays, Cherenkov radiation, High-energy astrophysics

Razumov Alexander Yurievich — leading programmer, master's degree student, alex.razumov98@gmail.com

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

И. А. Сайгин, С. А. Барталев, Ф. В. Стыцenco

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

В рамках работы приведено описание развития методов картографирования лесного покрова. Модификация метода позволила получить новый временной ряд карт растительного покрова, который, в свою очередь, был использован для построения более устойчивого временного ряда объёма стволовой древесины. Применение модифицированной версии алгоритма постобработки временного ряда позволило увеличить межгодовую стабильность карт растительного покрова. Проведена валидация карт растительного покрова на основе опорных данных на уровне таксационных выделов, показавшая общую точность классификации на основе матрицы ошибок на уровне 83,7 % для классов растительного покрова и на уровне 82,9 % для лесных классов растительного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, многоспектральные спутниковые изображения, растительный покров, классификация, опорная выборка

Одним из ключевых тематических продуктов, отражающих состояние и динамику растительности, представляется карта типов растительного покрова. Временной ряд карты растительности даёт возможность оценки многолетних изменений лесов под воздействием природных и антропогенных факторов, процессов возобновления и сукцессионной динамики растительного покрова (Барталев и др., 2011).

Ранее в работах (Барталев и др., 2016; Сайгин и др., 2020; Стыцenco и др., 2020) был представлен метод и результат картографирования земного покрова, основанный на динамической актуализации обучающей выборки, свободный от эффекта её нарастающей деградации (проект РНФ № 19-77-30015). В рамках настоящей публикации приведено описание развития методов картографирования лесного покрова.

В рамках работы предложены следующие методические решения:

- развитие методики картографирования лиственных лесов с учётом наличия подроста вечнозелёных древесных пород;
- модификация методики картографирования нелесных классов растительности;
- фильтрация временной серии карт растительного покрова;
- развитие методов формирования необлесённых гарей.

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ С УЧЁТОМ НАЛИЧИЯ ПОДРОСТА ВЕЧНОЗЕЛЁНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД

В результате выполненного сравнительного анализа карт растительного покрова и предварительных оценок прироста объёма стволовой древесины были обнаружены аномально высокие значения прироста запасов лиственного леса

Сайгин Илья Александрович — инженер, аспирант, saigin@d902.iki.rssi.ru

Барталев Сергей Александрович — главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, доктор технических наук, bartalev@d902.iki.rssi.ru

Стыцenco Федор Викторович — научный сотрудник, кандидат технических наук, fedor@d902.iki.rssi.ru

в отдельные годы, в частности в Псковской, Новгородской и других областях Европейской части страны (рис. 1).

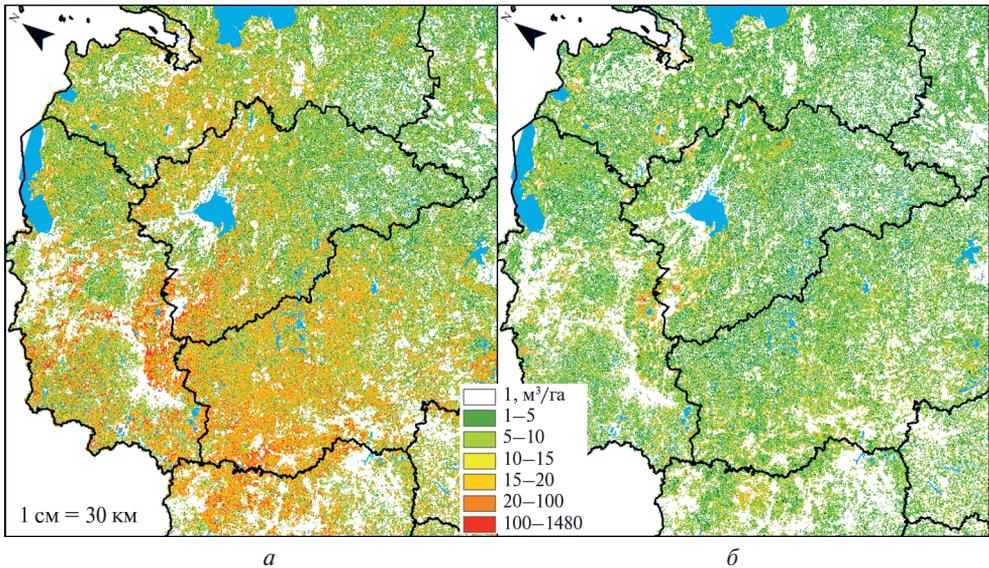


Рис. 1. Карты разницы запасов лиственного леса с 2006 по 2007 г. в Новгородской, Псковской областях: *a* — предыдущая версия; *б* — новая версия карт

Годовой прирост запаса в данных регионах составил более 20 м³/га, при этом на некоторых участках — более 100 м³/га, что представляется аномальным значением и маловероятным для лиственных лесов.

В результате анализа участков с годовым приростом более 100 м³/га с привлечением данных сверхвысокого разрешения, полученных с сервисов Bing Maps (www.bing.com/maps) и Google Maps (<https://www.google.com/maps>), было обнаружено, что на данной территории действительно произрастает лиственный лес (см. рис. 1), при этом имеется хвойный подрост вечнозелёных древесных пород, который оказывает значительное влияние на оценки запаса.

Для более корректного расчёта запасов стволовой древесины было принято решение добавить новый класс растительности: лиственный с хвойным подростом. Подразумевалось, что запас для данного класса может быть более корректно рассчитан с использованием параметров модели, применяемых для темнохвойного леса.

Был предложен метод классификации лиственного леса с хвойным подростом, основанный на разделении класса лиственного леса с использованием спектральной отражательной способности в красном (RED) и ближнем инфракрасном (ИК) (NIR) диапазоне спектра, измеренной в зимний период.

В ходе анализа спектральной яркости данных сенсора MODIS (*англ.* Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) в зимний период на территории Псковской и Новгородской областях было обнаружено, что для лиственного леса с наличием хвойного подроста наблюдается низкое значение коэффициента спектральной яркости (КСЯ) как в красном, так и ближнем инфракрасном каналах (рис. 2). Пороги классификации хвойного подроста были подобраны по двум признакам:

- 10 000 КСЯ < 350 для RED-канала;
- 10 000 КСЯ < 2050 для NIR-канала.

Применение данных порогов к временной серии спутниковых данных за 2001–2021 гг., позволило получить многолетние данные о пространственном распределении лиственного леса с наличием хвойного подроста. Данный класс добавлялся в результаты картографирования растительности на этапе постобработки наряду с другими внешними продуктами.

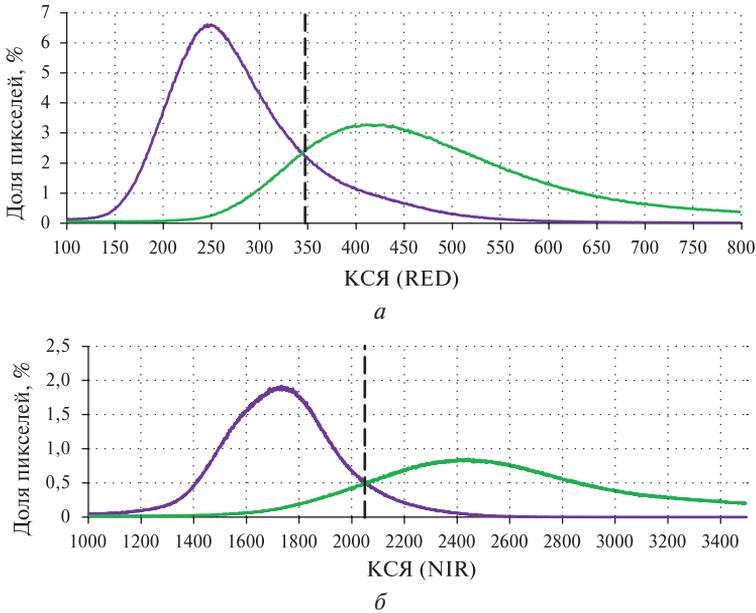


Рис. 2. КСЯ по зимним композитам MODIS в каналах: *а* — RED; *б* — NIR. Фиолетовый цвет — гистограмма КСЯ для лиственного леса с хвойным подростом, зелёный — гистограмма КСЯ для лиственного леса

По маскам данного класса растительности был посчитан объём древесины по уравнениям темнохвойного леса. На рис. 1 видно, что прирост запаса скорректирован и не превышает $20 \text{ м}^3/\text{га}$.

Применение нового класса растительности позволило уточнить карты объёма стволовой древесины, в частности скорректировать аномальный рост в 2007 г. и в последующие годы.

Предложенный метод был включён в состав методики картографирования растительного покрова.

Модификация методики картографирования нелесных классов растительности и фильтрация временной серии карт растительного покрова

В ходе анализа результата классификации карт растительного покрова было обнаружено, что нелесные территории, в частности вырубки, ошибочно классифицировались в лиственные и в светлохвойные леса. Это связано с тем, что на данных участках запрещалась классификация нелесных территорий по средствам априорных вероятностей для нелесных классов. В результате проделанных работ была произведена модификация карт априорных вероятностей, что позволило повысить достоверность классификации.

Фильтрация временной серии карт растительного покрова

Методика формирования временной серии карт растительного покрова подразумевает фильтрацию единичных выбросов с применением скользящего временного окна шириной три года. При этом не фильтруются карты, расположенные на концах временного ряда. Для фильтрации карт значение класса сравнивалось с последующими/предшествующими двумя значениями соответственно и при отличии заменялось на значение преобладающего класса. Такого рода выбросы могут быть вызваны переходами пикселя в смежные классы, а также недостатками композитных изображений. В случае применения данной схемы увеличивается устойчивость карт растительного покрова.

Классификация старых гарей

В предыдущей версии методики картографирования необлесённых гарей не учитывались гари, которые вызваны пожарами, произошедшими раньше начала периода наблюдений. На основе полученных карт в период с 2001 по 2020 г. было проведено исследование возможности классификации старых гарей до 2001 г. Для этого были проанализированы спектральные характеристики 15-летних и старше гарей, классифицированных по новой методике. Широкое применение для оценки состояния растительности получили так называемые спектральные вегетационные индексы, основанные на использовании данных дистанционных измерений отражательных свойств земной поверхности в нескольких диапазонах длин волн (Барталев и др., 2011). Проведённый ранее анализ (Барталев и др., 2016) показал, что для лесорастительных условий России высокую корреляцию степени пирогенного повреждения лесов продемонстрировали разностные вегетационные спектральные индексы dNDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный вегетационный индекс), RdNDVI (*англ.* Short-Wave Vegetation Index, коротковолновый вегетационный индекс), dSWVI и RdSWVI (1). А показатель SWIR/NIR (2) разделяет лесные классы от нелесных. Были выявлены два признака разделения старых гарей от лесных классов (RdSWVI, SWIR/NIR). Причём RdSWVI строился по данным до пожара и через 15 лет после пожара. Индекс рассчитывался только для стабильных гарей за этот период.

$$SWVI = \frac{R - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}}, \quad (1)$$

$$RdVI = \frac{VI_{pre} - VI_{post15}}{\sqrt{VI_{pre}}}, \quad (2)$$

где R_{NIR} и R_{SWIR} — коэффициенты отражения в ближнем и в среднем ИК диапазоне на длинах волн близких к 1,6 мкм; VI_{pre} и VI_{post15} — вегетационные индексы до пожара и через 15 лет после пожара.

На рис. 3 представлены гистограммы 15-летних гарей и лесных классов по RdSWVI и по SWIR/NIR.

На графиках видно, что лесные классы и старые гари по данным признакам разделимы. Так, для признака RdSWVI порог составляет больше $-0,06$, а для SWIR/NIR — меньше $0,9$. По данным порогам проводилась классификация старых гарей. Были построены карты старых гарей, площадь которых составила 12 млн га.

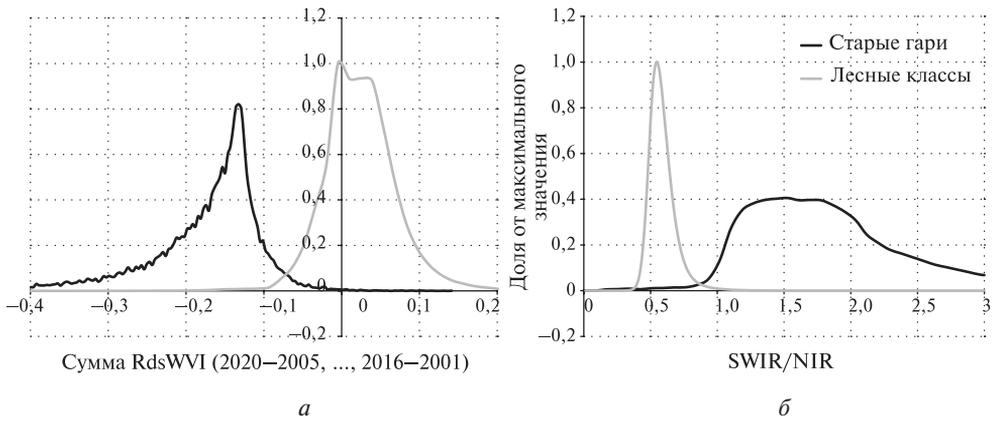


Рис. 3. Гистограммы 15-летних гарей и лесных классов для определения порога классификации: *а* — по RdSWVI; *б* — по SWIR/NIR

Модификация методики отнесения необлесённых гарей на основе анализа многолетнего ряда карт необлесённых гарей

Одним из этапов картографирования необлесённых гарей становится формирование для каждого года области интересов для классификации необлесённых гарей, которая заключается в объединении масок гарей текущего года и предыдущих лет. Такой подход подразумевает накопление маски пройденных площадей, что может приводить к ошибочным классификациям лесных классов в гарях. Чтобы избежать этого эффекта, было предложено модифицировать маски пройденных огнём площадей за каждый год. В случае классификации пикселя, попавшего ранее в маску пройденных огнём площадей, в один из лесных классов три и более лет подряд, данный пиксель исключался из рассмотрения. По новым областям интересов был получен временной ряд карт необлесённых гарей за период 2001–2020 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После применения всех методических решений, описанных выше, был получен новый временной ряд растительного покрова с улучшенной межгодовой стабильностью классов. Модифицированные карты необлесённых гарей показали большую корреляцию с другими пожарными тематическими продуктами, полученными в ИКИ РАН. Покрытая лесом площадь в период с 2001 по 2021 г. представлена на рис. 4.

В рамках выполненных работ была проведена валидация карт растительного покрова на основе опорных данных на уровне таксационных выделов, показавшая общую точность классификации на основе матрицы ошибок на уровне 83,7% для классов растительного покрова и на уровне 82,9% для лесных классов растительного покрова; также проведён анализ распределения точности распознавания по отдельным классам. Проведена валидация необлесённых гарей по сверхвысокому разрешению. Общая точность распознавания необлесённых гарей составила 79%.

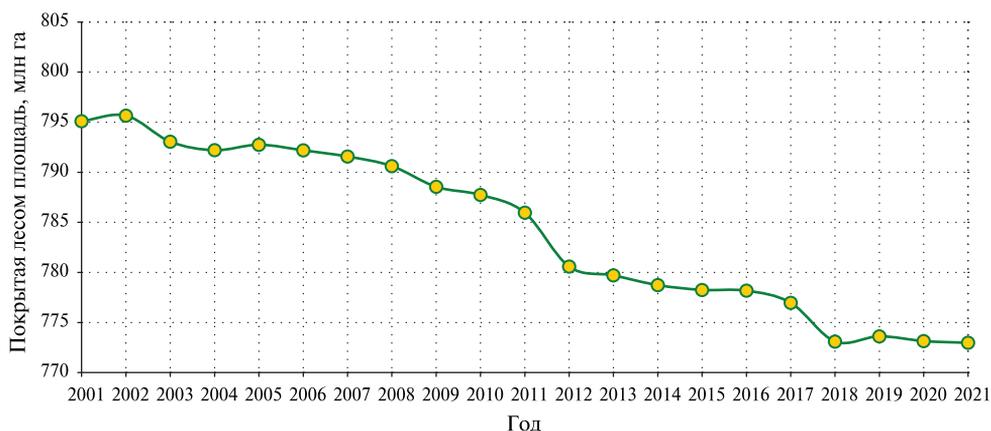


Рис. 4. Покрываемая лесом площадь в период с 2001 по 2021 г.

Исследования проводились с использованием инфраструктуры хранения и обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

ЛИТЕРАТУРА

- Барталев С. А., Егоров В. А., Еришов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
- Сайгин И. А., Барталев С. А., Стыценко Ф. В. Методика динамической актуализации опорной выборки для классификации растительности на основе спутниковых данных // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 нояб. 2020, ИКИ РАН. 2020. С. 358. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- Стыценко Ф. В., Сайгин И. А., Барталев С. А. Методика ежегодного картографирования необлесенных гарей на основе спутниковых данных // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 нояб. 2020, ИКИ РАН. 2020. С. 366. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.

DEVELOPMENT OF LAND COVER MAPPING METHODS

I. A. Saigin, S. A. Bartalev, F. V. Stytsenko

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

Within the framework of this work, a description of the development of methods for mapping forest cover is given. Modification of the method made it possible to obtain a new time series of vegetation cover maps, according to which a more stable time series of stem wood volume was built. Also, after applying a modified version of the post-processing of the time series, the stability of vegetation cover maps increased. Vegetation maps were validated based on reference data at the level of taxation units, showing an overall classification accuracy based on the error matrix at the level of 83.7 % for classes of predominant species, and at the level of 82.9 % for forest cover classes.

Keywords: remote sensing, multispectral satellite imagery, land cover. classification, reference sample

Stytsenko Fedor Victorovich — candidate of engineering sciences, fedor@d902.iki.rssi.ru

Bartalev Sergey Aleksandrovich — head of the laboratory, doctor of engineering sciences, bartalev@d902.iki.rssi.ru

Saigin Ilya Aleksandrovich — engineer, postgraduate, saigin@d902.iki.rssi.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ В ДИСКОВЫХ СИСТЕМАХ

Е. А. Семенюк, А. С. Петросян

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

Предложен численный алгоритм решения задачи транспорта частиц в турбулентном газовом течении протопланетного диска. Моделирование проведено в два этапа: на первом получено решение для сжимаемого нейтрального газа в локальной ячейке, на втором рассматривается локальная динамика частиц в газовом потоке. Полученные результаты приближённо описывают механизм роста протопланет в протопланетных дисках путём парных столкновений частиц пыли в турбулентном потоке.

Ключевые слова: турбулентность, протопланетные диски, астрофизические диски, кластеризация частиц, формирование планет, вычислительная гидродинамика, локальное моделирование, модель сдвиговых ячеек

Планеты формируются в протопланетных дисках путём парных столкновений частиц межзвёздной пыли. Характер данных столкновений во многом определяется параметрами твёрдых частиц и их взаимодействием с турбулентным газовым течением в диске. В настоящей работе исследуется динамика межзвёздной пыли в турбулентном потоке газа. Для достижения поставленной цели проведено численное моделирование движения пыли в ограниченной области протопланетного диска. Пренебрежение влиянием частиц на динамику газового потока позволяет разделить решение поставленной задачи на два этапа: на первом осуществлено локальное моделирование турбулентного течения газа, на втором — моделирование движения частиц в потоке газа.

Динамика сжимаемого газового течения рассматривается в трёхмерном случае и описывается уравнением Навье–Стокса, уравнением непрерывности и уравнением состояния. Глобальная постановка задачи не позволяет исследовать парные столкновения частиц, поскольку они носят локальный характер. В связи с этим осуществлён переход к локальной области протопланетного диска. Локальное приближение заключается в том, что получающиеся уравнения для возмущений на устойчивом основном потоке совпадают с исходными глобальными уравнениями в небольшой области вокруг фиксированной точки в диске. Обезразмеривание локальных уравнений осуществлено с помощью эффективного давления, эффективной плотности и двух малых безразмерных параметров, связанных с характерным размером вычислительной области. Скорость и давление газа представлены в виде сумм стационарных величин и возмущений. Для протопланетного диска зафиксирована удалённая ячейка, высота которой гораздо меньше толщины протопланетного диска. В этом случае безразмерная система уравнений для возмущений при отсутствии флуктуаций плотности в начальный момент времени является несжимаемой, что сильно упрощает процесс вычислений и приводит к уравнениям модели Small Shearing Box. Вывод уравнений Shearing Box подробно изложен в работе (Hawley et al., 1995).

Начальное условие для возмущений скорости и давления получено с помощью метода синтетической турбулентности, в котором поле скоростей представ-

Семенюк Евгений Алексеевич — аспирант, semenyuk.ea@phystech.edu

Петросян Аракел Саркисович — заведующий сектором,
доктор физико-математических наук, профессор

лено в виде суммы статистически независимых мод Фурье со случайными коэффициентами, которые подбираются таким образом, что результирующее поле скоростей удовлетворяет уравнению непрерывности, имеет форму заданного для уравнения Эйлера энергетического спектра изотропной трёхмерной турбулентности. Данный подход позволяет сгенерировать однородную изотропную турбулентность, оптимальную с точки зрения процесса рандомизации.

Как показано в работе (Pan et al., 2011), движение пыли в турбулентном газовом потоке в простейшем случае определяется трением между газом и твёрдыми частицами. Режим трения зависит от размера частиц, в данной задаче рассматриваются только малые частицы. Для отслеживания скоплений пылевых агрегатов движение пыли рассматривается в эйлеровом представлении. На результирующем распределении изменения плотности пыли отчётливо наблюдаются устойчивые области сжатия межзвёздной пыли, что свидетельствует о кластеризации межзвёздной пыли. Таким образом, полученные результаты приближённо описывают механизм роста планетезималей в протопланетных дисках путём парных столкновений частиц пыли в турбулентном течении.

ЛИТЕРАТУРА

- Hawley J. F., Gammie C. F., Balbus S. A. Local Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks // *The Astrophysical J.* 1995. V. 440. P. 742–763. DOI: 10.1086/175311.
- Pan L., Padoan P., Scalo J., Kritsuk A. G., Norman M. L. Turbulent Clustering of Protoplanetary Dust and Planetesimal Formation // *The Astrophysical J.* 2011. V. 740. No. 1. Art. No. 6. 21 p. DOI: 10.1088/0004-637X/740/1/6.

NUMERICAL MODELING OF PARTICLE TRANSPORT IN DISK SYSTEMS

E. A. Semenyuk, A. S. Petrosyan

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

A numerical algorithm for solving the problem of particle transport in a turbulent gas flow of a protoplanetary disk is proposed. The simulation was carried out in two stages: at the first stage, a solution is obtained for a compressible neutral gas in a local cell; at the second stage, the local dynamics of particles in a gas flow is considered. The results obtained approximately describe the mechanism of protoplanet growth in protoplanetary disks by pair collisions of dust particles in a turbulent flow.

Keywords: turbulence, protoplanetary disks, astrophysical disks, particle clustering, planet formation, computational fluid dynamics, local simulation, shear cell model

Semenyuk Evgeniy Alekseevich — postgraduate, semenyuk.ea@phystech.edu

Petrosyan Arakel Sarkisovich — head of the department, doctor of physical and mathematical sciences, professor

СРАВНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПЕПЛОВ С ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА СО СВОЙСТВАМИ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

А. В. Уварова

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)
Москва, Россия

Лаборатория геохимии Луны и планет ГЕОХИ РАН занимается разработкой полномерного грунта-аналога, который будет приближен к лунному реголиту не только по физическим свойствам, но и по химическому и минеральному составу. Основная цель настоящего исследования заключается в рассмотрении нескольких пеплов с вулканов Толбачик, Горелый и Мутновский, а также Халактырского пляжа как потенциальных лунных грунтов-аналогов. В работе приведены результаты испытаний пеплов одноплоскостным срезом.

Ключевые слова: пеплы, грунты-аналоги, механические свойства

ВВЕДЕНИЕ

Типичный лунный реголит по гранулометрическим характеристикам представляет собой плохо отсортированный песчано-алевритовый грунт с примесью щебня и глыб. Медианный размер частиц изменяется в пределах от 0,04 до 0,130 мм со средним значением 0,07 мм (Carriger, 1973). Также следует отметить, что большинство образцов лунного реголита характеризуются преобладанием грубозернистой фракции из свежих выбросов и тонкодисперсной фракции зрелого реголита, что указывает на недостаточную сортировку лунного реголита, в отличие от земных рыхлых пород (Slyuta, 2014).

Естественная плотность лунного реголита на поверхности до глубины 15 см, согласно данным с миссий космического аппарата (КА) «Луна-16», «Луна-20», изменяется от 1,12 до 1,7 г/см³ со средним значением около 1,5 г/см³. Данные миссий «Аполлон» (*англ.* Apollo) показали, что среднее значение плотности реголита на поверхности, равно 1,3 г/см³, но потом резко возрастает с глубиной по гиперболической зависимости. Глубже 60 см плотность грунта реголита возрастает незначительно, и на глубине около 3 м приближается к значению 1,92 г/см³ (Carriger et al., 1991).

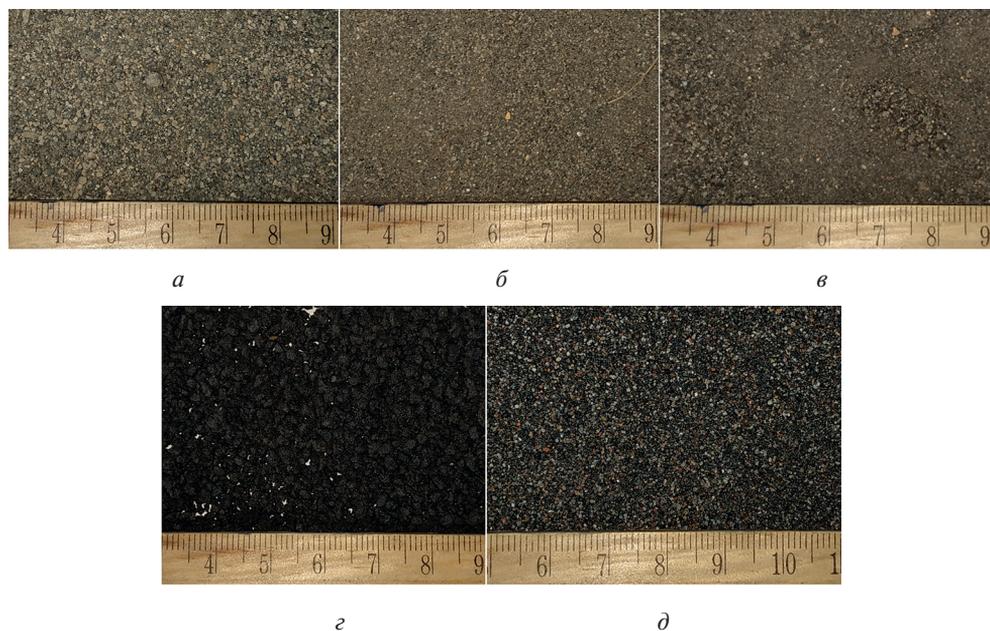
Что касается механических характеристик, то основные прочностные из них — угол внутреннего трения и сцепление. На поверхности лунный грунт в рыхлом состоянии имеет незначительное сцепление, примерно 0–1 кПа, и угол внутреннего трения 40–50° (Slyuta, 2014). Оценка учёными исследования (Mitchell et al., 1972) устойчивости скважин от осыпания миссий Apollo-16 и Apollo-17 показала, что подобное возможно при удельном сцеплении в местах посадок равном 1,1–1,8 кПа и угле внутреннего трения 46,5°. Испытания лунного грунта с мест посадок КА «Луна-16» и «Луна-20» проводили на образцах при разном предварительном уплотнении, и по мере увеличения плотности выше 1,5 г/см³ угол внутреннего трения приближается к 25°, дальнейший рост сопротивления сдвигу происходит в основном за счёт увеличения удельного сцепления (Леонович и др., 1974).

Лаборатория геохимии Луны и планет Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН) занимается изучением способов разработки грунтов-аналогов, имитирующих лунный реголит.

Разработанный ранее лунный грунт-аналог VI-75 (Slyuta et al., 2021) хорошо имитирует физико-механические свойства, но он не моделирует минеральный состав. В связи с этим лаборатория занимается разработкой минеральных аналогов, которые будут подходить не только по составу, но и по основным свойствам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лунный реголит состоит из пород основного состава, морские области преимущественно сложены базальтами. Необходимые компоненты для будущего грунта-аналога следует искать в местах выхода подобных пород, причём маленькой размерности частиц. Среди таких мест выделяется полуостров Камчатка, расположенный в тихоокеанском огненном кольце, где излившиеся потоки лав могут иметь как кислый, так и основной состав, но всё же последний преобладает. Чтобы состав был более разнообразный, пробы взяты с трёх разных вулканов: Мутновского, Горелого (с подножья и с высоты 1390 м) и Толбачика, а также Халактырского пляжа (Агапкин, 2022), всего пять образцов (рисунок).



Образцы пеплов с полуострова Камчатка: *а* — влк. Мутновский; *б* — влк. Горелый, подножье; *в* — влк. Горелый, склон (высота 1390 м); *г* — влк. Толбачик; *д* — Халактырский пляж

В настоящей работе представлены результаты по определению плотности, угла внутреннего трения и сцепления. Для их определения выполнены испытания срезом для рыхлого и плотного сложений. Нормальное напряжение задавалось в зависимости от плотности образцов в пределах от 10 до 50 кПа для рыхлых образцов и от 50 до 200 кПа для плотных. Касательная нагрузка определялась как максимальное касательное напряжение, при котором разрушался образец. Скорость разрушения составляла 2 мм/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Диапазон плотности у всех образцов вулканических пеплов не соответствует полностью лунному (таблица), однако образцы вулканов Мутновский (1,17–1,46 г/см³) и Горелый с высоты 1390 м (1,05–1,37 г/см³) близки по свойствам к приповерхностному слою лунного реголита. Образцы влк. Мутновский имеют диапазон угла внутреннего трения 42–51,5° и сцепления 2,2–19,5 кПа, а пеплы с влк. Горелый 33,3–39,2° и 1,3–16,2 кПа. Образцы с влк. Толбачик имеют слишком маленькую плотность из-за более грубозернистого состава (0,89–1,04 г/см³), а грунт с Халактырского пляжа, наоборот, имеет большую плотность (1,60–1,81 г/см³) (см. таблицу).

Сопоставление пеплов Камчатки и лунного грунта

	Плотность, г/см ³	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, кПа
Толбачик	0,89–1,04	41,7–46,1	5,4–57,5
Мутновский	1,17–1,46	42,0–51,5	2,2–19,5
Горелый (подножье)	1,17–1,44	29,7–36,1	2,8–20,0
Горелый (1390 м)	1,05–1,37	33,3–39,2	1,3–16,2
Халактырский пляж	1,60–1,81	28,3–41,1	1,3–17,9
Лунный реголит	1,30–1,90	25,0–50,0	0–3,0

ВЫВОДЫ

Рассмотрение камчатских пеплов как потенциальных аналогов лунного грунта показало, что они не смогут в полной мере имитировать лунный грунт. Однако образцы с вулканов Мутновский и Горелый могут быть использованы для имитации верхнего слоя (до глубины 15 см) реголита. Изучение гранулометрического состава также подтвердило, что наиболее приемлемыми оказываются образцы с вулканов Мутновский и Горелый (с высоты 1390 м).

Предварительные исследования минерального состава наоборот, близкими по составу выделяют образцы с влк. Толбачик и Халактырского пляжа, поэтому дальнейшие исследования будут направлены на изучение измельчённых проб данных образцов; для достижения лучшего результата также будут рассмотрены возможные варианты смешивания различных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

- Агапки И. А. Сравнение гранулометрического состава камчатских пеплов с лунным реголитом // 19-я Конф. молодых учёных «Фундамент. и приклад. космич. исслед.». ИКИ РАН, Москва, 13–15 апр. 2022: сб. тр. / под ред. А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2022. С. 5–7. DOI: 10.21046/KMU-2022-5-7.
- Леонович А. К., Громов В. В., Дмитриев А. Д., Ложкин В. А., Павлов П. С., Рыбаков А. В. Результаты исследований физико-механических свойств образца лунного грунта в исследовательском боксе в среде азота // Лунный грунт из Моря Изобилия / под ред. Виноградова А. П. М.: Наука, 1974. С. 563–570.
- Carrier W. D. Lunar soil grain size distribution // The Moon. 1973. V. 6. P. 250–263.

- Carrier W. D. III, Olhoefi G. R., Mendell W.* Physical properties of the lunar surface // Lunar Sourcebook / eds. Heiken G., Vaniman D., French B. M. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.
- Mitchell J. K., Houston W. N., Scott R. F., Costes N. C., Carrier W. D. III, Bromwell L. G.* Mechanical properties of lunar soil: density, porosity, cohesion, and angle of friction // Proc. 3rd Lunar Scientific Conf. 1972. V. 3. P. 3235–3253.
- Slyuta E. N.* Physical and mechanical properties of the lunar Soil (A review) // Solar System Research. 2014. V. 48(5). P. 330–353.
- Slyuta E. N., Grishakina E. A., Makovchuk V. Yu., Agapkin I. A.* Lunar soil-analogue VI-75 for large-scale experiments // Acta Astronautica. 2021. V. 187. P. 447–457.

COMPARISON OF THE MECHANICAL PROPERTIES BETWEEN THE ASHES FROM THE KAMCHATKA PENINSULA AND LUNAR SOIL

A. V. Uvarova

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia

The Laboratory of geochemistry of Moon and Planets is developing a full-scale soil-analogue, which will imitate both the physical properties and the chemical and mineralogical composition of the lunar regolith. The main objective of this study is consideration of several ashes from the Tolbachik, Gorely and Mutnovsky volcanoes, as well as the Khalaktyrsky beach as potential lunar soil analogues. This work describes the results of shear test for these volcanic ashes.

Keywords: ashes, soil-analogues, mechanical properties.

Uvarova Alexandra Vladimirovna — junior researcher, uvarova@geokhi.ru

ВАРИАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ РАВНИНЫ УТОПИЯ НА МАРСЕ ПО ДАННЫМ CRISM

Е. Д. Фабер

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

На сегодняшний день существуют убедительные доказательства существования различных видов водоёмов на раннем Марсе, но окончательные доказательства существования океана в северной части полушария остаются недостижимыми. Настоящее исследование ставит своей целью охарактеризовать композиционные вариации состава отложений в районе равнины Утопия. В работе используются данные (<https://doi.org/10.1029/2019JE006337>) о глобальных типах марсианской поверхности, которые классифицируются на основе мультиспектральных сводных параметров Вивиано-Бек по данным CRISM с пониженной дискретизацией. Поскольку тонкие вариации состава неуловимы в усреднённом разрешении, то в дополнение к ним в работе рассматривается набор областей интереса в гиперспектральном разрешении данных CRISM формата TRDR. Данные с усреднёнными значениями позволяют сузить область поиска, в которой можно найти интересные минералогические закономерности. С помощью статистического метода главных компонент для полученных мультиспектральных данных CRISM идентифицируются параметры, вносящие существенный вклад в дисперсию в области исследования, после чего разграничиваются области, демонстрирующие закономерности, в которых производится детальный спектральный анализ. В результате получен список главных компонент и построены графические карты распределения главных компонент в формате RGB, а также 20 карт сводных параметров, участвующих в исследовании. С помощью спектрального анализа обнаружены такие интересные минеральные группы, как филлосиликаты, сульфаты и другие гидратированные минералы, подтверждение которых требует дополнительных методов проверки.

Ключевые слова: планеты, Марс, минералогия Марса, геология Марса, ДЗЗ, спектрофотометрия, CRISM

ВВЕДЕНИЕ

Гипотеза древнего океана на северных равнинах Марса — один из самых интригующих и обсуждаемых вопросов марсианской геологии. Для данного исследования была выбрана область равнины Утопия (*лат.* Utopia Planitia) — это часть формации Ваститас Бореалис (Великая Северная равнина, *лат.* «северные пустоши» — Vastitas Borealis). Её геологические особенности в совокупности позволяют предположить, что в самых глубоких частях бассейна Утопия существовал протяжённый резервуар воды или грязи (Ivanov et al., 2015).

Состав Северной низменности до сих пор недостаточно изучен. В данной работе основное внимание будет уделено характеристике композиционных вариаций в районе равнины Утопия. Гиперспектральные данные, собранные спектрометром CRISM (*англ.* Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars), произвели революцию в нашем понимании планеты. Десятки тысяч изображений доступны для анализа, чтобы понять геологическую историю и обитаемость Марса путём выявления минералов и картирования минералосодержащих единиц. Прямое автоматическое сопоставление библиотечных спектров минералов, измеренных на Земле, с данными CRISM невозможно, поскольку

мы наблюдаем крупномасштабные геологические массивы, представляющие собой смесь минералов, обладающих характерными спектральными свойствами, а также из-за сложности в обработке сигналов набора данных. Основу метода идентификации минералов в настоящей работе составляют сводные параметры (Viviano-Beck et al., 2014), полученные на ключевых длинах волн, охватывающих спектральные характеристики конкретных минеральных фаз.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования была выбрана область равнины Утопия в границах 90–100° в. д. и 20–40° с. ш.; участок обладает наименьшей запылённостью по данным карты пылевого покрова теплового эмиссионного спектрометра (*англ.* Thermal Emission Spectrometer, TES). Для первой части исследования используются данные в режиме мультиспектрального картографирования, представленные в виде орбитальных полос, которые затем объединяются в мозаику размером 5×5°, называются MRDR (*англ.* Multispectral Reduced Data Records) и доступны для загрузки на портале Mars Orbital Data Explorer (MODE) (<https://ode.rsl.wustl.edu/mars/>). Сводные параметры были рассчитаны на основе набора данных MRDR (Kamps et al., 2019), а затем объединены в мозаику в экстенде, охватывающем регион равнины Утопия. Пространственное разрешение этого набора данных составляет ~200 м на пиксель. Карты, составленные для области нашего исследования, наряду с глобальными картами О. М. Кампса с коллегами сыграли решающую роль в выборе того, какие из сводных параметров будут использоваться для анализа данных.

Поскольку область исследования включает в себя и запылённую, и свободную от пыли поверхность, то возникла необходимость в разграничении этих областей для согласования анализа. В качестве визуализации дисперсии в регионе использовался метод главных компонент (*англ.* Principal Component Analysis, PCA). Также это быстрый и эффективный метод визуализации явных дисперсий в большом наборе данных. Сводные параметры после предварительной обработки, описанной выше, подвергались PCA с использованием открытого лицензионного пакета обработки NumPy (*англ.* Hyperspectral Python) (Bakker, 2018). Затем паттерны, проявляющиеся в компонентах PCA, необходимо также охарактеризовать спектрально, чтобы лучше понять вариации состава.

Дальнейший детальный спектральный анализ проводился с использованием инструментария JCAT (*англ.* Java CRISM Analysis Toolkit). Целевые данные CRISM калибруются по I/F (коэффициенту отражения) и обрабатываются в гиперспектральные кубы изображения I/F MTRDR (*англ.* Map Projected Targeted Reduced Data Record) (Seelos et al., 2012). Данные MTRDR были преобразованы в сводные параметры с помощью функционала JCAT и отображены в RGB-формате (*англ.* red, green, blue — красный, зелёный, синий) в виде продуктов обзора (*англ.* Browse Products). Спектральные сводные параметры чувствительны к силе поглощения из-за ключевых минеральных фаз и использовались для определения выделенных областей со спектральным разнообразием и областей интереса для детального анализа по единичным, усреднённым на 5×5 пикселей или с помощью выделения интересующей области пикселей гиперспектральных данных. Спектры из областей интереса извлекались, усреднялись и сравнивались с наборами библиотечных данных (Viviano-Beck et al., 2014). Ключевые спектры усреднялись и затем использовались в качестве знаменателя при расчёте отношения, чтобы подчеркнуть спектральные характеристики материала интересующего участка. В остальных случаях приведены спектры отражения I/F.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице приведено процентное распределение основных компонент из сводных параметров, участвовавших в PCA анализе. Были визуализированы 20 отдельных компонент, а также композиции RGB (рис. 1) основных компонент. Ключевое наблюдение из композиции PCA на рис. 2 заключается в том, что наблюдаемые закономерности вполне сопоставимы с закономерностями, представленными на карте индекса пылевого покрова TES. Это может быть связано с тем, что параметры, описывающие дисперсию первых компонент, а именно ISLOPE1 и SH600_2, выделяющие фазу железа, могут также выделять железистый компонент пыли.

Положительные и отрицательные процентные составляющие вкладов главных компонент сводных параметров по результатам метода главных компонент

Компонент	Сводные параметры, %	
	с положительным вкладом	с отрицательным вкладом
PC1	ISLOPE1 (27,36) BD2210 (18,16) SH600_2 (17,12)	SH770 (15,53)
PC2	BD2230 (21,23) MIN2200 (14,77) SINDEX2 (13,9)	LCPINDEX (16,85) D2300 (12,35)
PC3	BD1300 (15,65)	OLINDEX3 (27,35) BD3100 (19,84) HCPINDEX2 (17,22)

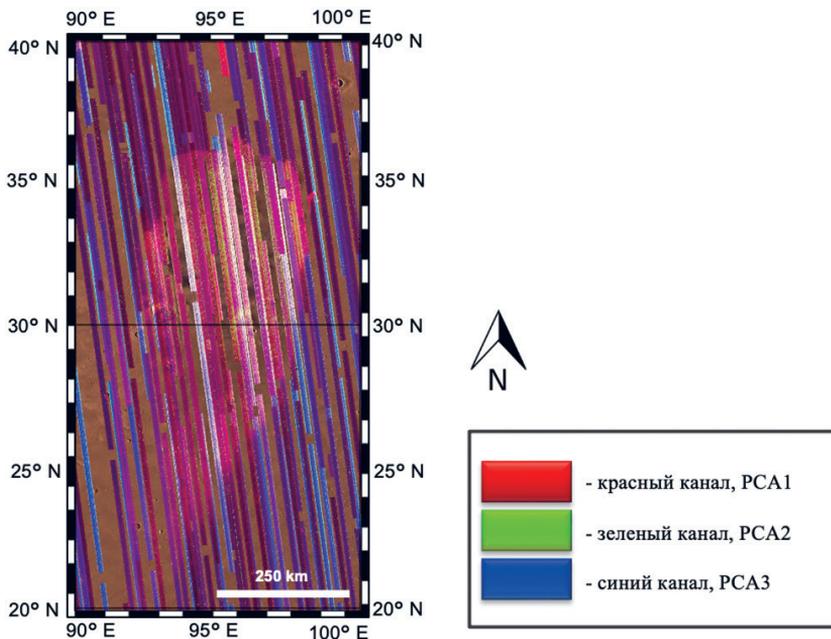


Рис. 1. Результаты метода главных компонент. Исследуемая область в формате RGB, где каждая компонента выделена соответствующим цветом

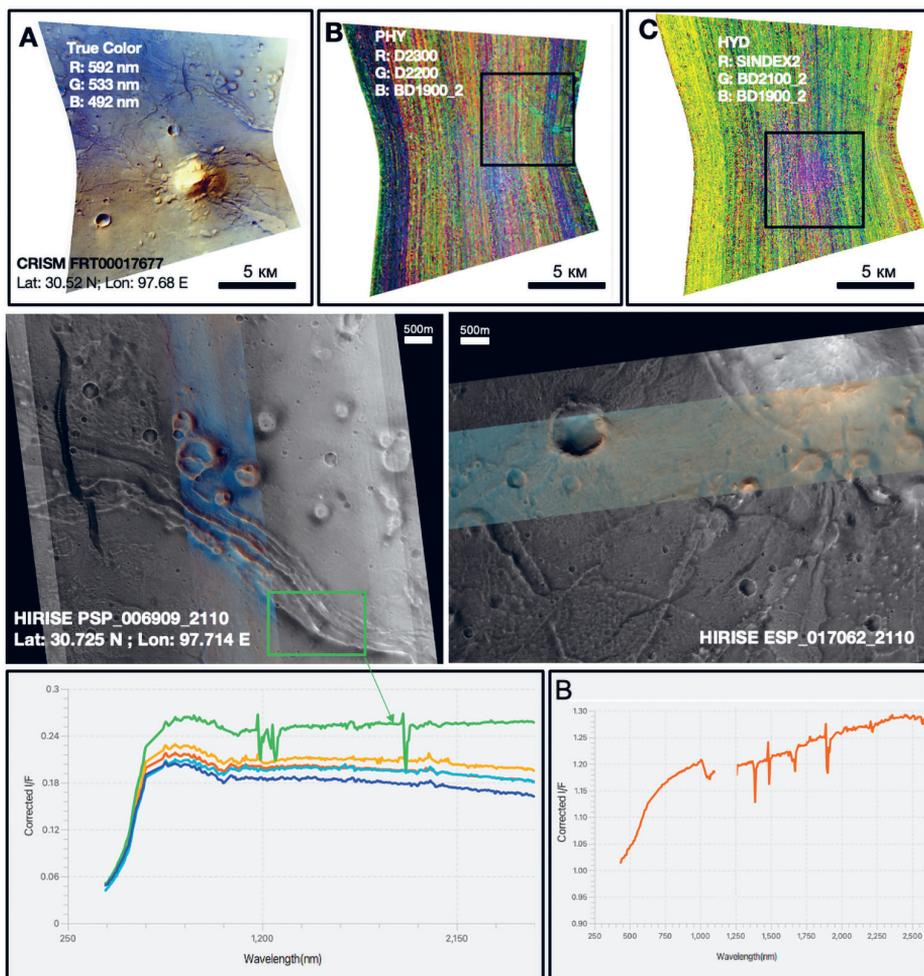


Рис. 2. Результаты анализа FRT00017677: А — изображение в видимом диапазоне; В, С — изображения продуктов обзора PHY и HYD соответственно. Во втором ряду представлены снимки HiRISE (*англ.* High Resolution Imaging Science Experiment) в высоком разрешении с выделением интересных областей. В последнем ряду — средний спектр области, а также спектральное отношение (В) в зелёной области к среднему значению спектра области вдоль канала.

На рис. 2А можно увидеть интересные неровности рельефа, напоминающие русло и купол, предположительно грязевой вулкан. Явное присутствие гидратированной минералогии. Полигидратированные сульфаты имеют сильные полосы поглощения 1,9 мкм и, таким образом, отображаются пурпурным цветом в продукте просмотра HYD (рис. 2С). Синий цвет указывает на другие гидратированные минералы (такие как глины, гидратированный кремнезём, карбонат или цеолит).

Продукт PHY (рис. 2В) отображает информацию о гидроксильных минералах, включая филлосиликаты. Минералы, содержащие Al/Si-OH (гидратированный кремнезём), при гидратации будут казаться зелёно-голубыми. Синий цвет указывает на другие гидратированные минералы (Viviano-Beck et al., 2014). Результаты наложения продуктов обзора выявили возможное присутствие

гидратированного кремнезёма, Al/Si-ОН, ярозита и полигидратированных сульфатов, похожих на цеолит. Они располагаются в породах у подножья справа и ближе к центральной вершине (на изображении рис. 2В — синяя область в центре, на правом снимке HiRISE в области цветной полосы видимого диапазона). Размер цеолитсодержащих выходов сравнительно невелик, не более нескольких десятков пикселей CRISM.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленные области интереса из нашего исследования накладываются на глобальную классификацию типов поверхности, созданную в исследовании (Kamps et al., 2019). Регион показывает более высокое интерпретированное содержание сульфатов, а также гидратированных минералов.

Изменение первичных минералов в результате циркуляции кислых грунтовых вод или испарения стоячих водоёмов могло привести к осаждению сульфатсодержащих отложений (Bibring et al., 2006). Карбонатные отложения — ожидаемый продукт взаимодействия воды и базальта в атмосфере, богатой CO₂. Гидратированные сульфаты могут образоваться в результате значительного кислотного выветривания пыли и песка внутри ледяных отложений при определённых условиях (Niles et al., 2009).

Данный набор минералогии соотносится с известной морфологией поверхности. Поверхность пластов Ваститас Бореалис имеет ряд особенностей, которые согласуются с наличием большого резервуара воды или льда в пределах северных низменностей. К таким особенностям относятся комплексы невысоких извилистых/криволинейных хребтов, напоминающих морены и озы, ударные кратеры с валовыми и блинообразными выбросами (Ivanov et al., 2014).

ВЫВОДЫ

Установление единой теории формирования на основе результатов и интерпретаций этого исследования — сложная задача, поскольку Северная низменность Марса сформировалась в результате различных процессов.

Хотя поверхностные единицы северных низменностей могли образоваться в результате эпизодических наводнений и отложений льда — время, продолжительность и характер активности водной среды в прошлую эпоху остаются открытыми вопросами. Поскольку северные низменности в значительной степени покрыты пылью, которая затемняет спектроскопические признаки с орбиты, только спорадические водосодержащие минералы были идентифицированы в основном в крупных ударных кратерах, интерпретируемых как раскопанные древние пласты (например (Carter et al., 2010; Poulet et al., 2010)). Некоторые признаки гидратированных минералов, связанные с конусами и особенностями (возможных) потоков, также были идентифицированы в области исследования, но только в локализованных областях из-за ограниченного охвата орбитальными данными. Метод РСА, с одной стороны, упростил начальную стадию исследования, а с другой — не дал уверенных результатов. Следовательно, геохимические и минералогические исследования *in situ* геологических единиц по-прежнему представляются незаменимыми методами исследования.

На основе проведённого исследования можно заключить, что данная область равнины Утопия имеет локальные спектральные признаки таких минералогических групп как филлосиликаты, сульфаты и другие гидратированные минералы.

ЛИТЕРАТУРА

- Bakker W. H.* HypPy User Manual / University of Twente. 2018. <https://blog.utwente.nl/bakker/hyppy/>.
- Bibring J. P., Langevin Y., Mustard J. F., Poulet F., Arvidson R., Gendrin A., Gondet B., Mangold N., Pinet P., Forget F., Berthé M., Bibring J.-P., Gendrin A., Gomez C., Gondet B., Jouglet D., Poulet F., Alain Soufflot, Mathieu Vincendon, Michel Combes, Pierre Drossart, Thérèse Encrenaz, Fouchet Th., Merchiorri R., Belluci G., Altieri F., Formisano V., Capaccioni F., Cerroni P., Coradini A., Fonti S., Korablev O., Kottsov V., Ignatiev N., Moroz V., Titov D., Zasova L., Loiseau D., Mangold N., Pinet P., Douté S., Schmitt B., Sotin Ch., Hauber E., Hoffmann H., Jauermann R., Keller U., Arvidson R., Mustard J. F., Duxbury T., Forget F., Neukum G.* Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars express data // *Science*. 2006. V. 312(5772). P. 400–404. <https://doi.org/10.1126/science.1122659>.
- Carter J., Poulet F., Bibring J.-P., Murchie S.* Detection of hydrated silicates in crustal outcrops in the northern plains of Mars // *Science*. 2010. V. 328(1682). P. 1682–1686. DOI: 10.1126/science.1189013.
- Ivanov M. A., Hiesinger H., Erkelingb G., Reiss D.* Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia on Mars: Evidence for the ancient ocean // *Icarus* 2014. V. 228. P. 121–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2013.09.018>.
- Ivanov M. A., Hiesinger H., Erkelingb G., Reiss D.* Evidence for large reservoirs of water/mud in Utopia and Acidalia Planitiae on Mars // *Icarus*. 2015. V. 248. P. 383–391. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2014.11.013>.
- Kamps O. M., Hewson R. D., van Ruitenbeek F. J. A., van der Meer F. D.* Defining Surface Types of Mars using Global CRISM Summary Product Maps // *J. Geophysical Research E: Planets*. 2020. V. 125. Iss. 8. 18 p. <https://doi.org/10.1029/2019JE006337>.
- Niles P. B., Michalski J.* Meridiani Planum sediments on Mars formed through weathering in massive ice deposits // *Nature Geoscience*. 2009. V. 2. P. 215–220.
- Seelos F. P., Morgan M. F., Taylor H. W., Murchie S. L., Humm D. C., Seelos K. D., Barnouin O. S., Viviano C. E., Team CRISM.* CRISM Map Projected Targeted Reduced Data Records (MTRDRs) – High level analysis and visualization data products, in *Planetary Data: A Workshop for Users and Software Developers*. U. S. Geological Survey, Reston, Va. 2012.
- Viviano-Beck C. E., Seelos F. P., Murchie S. L., Kahn E. G., Seelos K. D., Taylor H. W., Taylor K., Ehlmann B. L., Wiseman S. M., John M F, Morgan M. F.* Revised CRISM spectral parameters and summary products based on the currently detected mineral diversity on Mars // *J. Geophysical Research E: Planets*. 2014. V. 119. Iss. 6. P. 1403–1431. <https://doi.org/10.1002/2014JE004627>.

MINERALOGICAL VARIATIONS OF DEPOSITS IN THE UTOPIA PLANITIA REGION OF MARS DERIVED FROM CRISM OBSERVATIONS

E. D. Faber

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

This study aims to characterize the compositional variations prevailing over the southern region in Utopia Planitia. This study uses data obtained by Kamps et al., (2020), where Martian global surface types are classified based on the downsampled averaged CRISM multispectral summary product data (Viviano-Beck et al., 2014). This study uses data obtained by Kamps (<https://doi.org/10.1029/2019JE006337>), where Martian global surface types are classified based on the downsampled averaged CRISM multispectral data with Viviano-Beck summary products. In addition to regional characterisation of the study area, a set of regions of interest in the hyperspectral resolution of TRDR CRISM dataset were consider. Data with average values allows you to

narrow the search area, in which you can find interesting mineralogical patterns. Principal component analysis (PCA) is carried out on the CRISM summary product data. Significant products contributing to the variance in the regions are identified, following which the regions exhibiting patterns in the PCA composites are demarcated. The spectra of the ROIs regions are analysed. As a result, a list of principal components was obtained and graphic maps of the distribution of principal components in RGB format were constructed, as well as 20 maps of summary parameters involved in the study. Spectral analysis of ROIs regions has revealed such interesting mineral groups as phyllosilicates, sulfates and other hydrated minerals, the confirmation of which requires additional verification methods.

Keywords: planetary science, Mars, Mars mineralogy, mineralogy, remote sensing, CCRISM, PSA, spectroscopy, imaging spectroscopy

Faber Ekaterina Dmitrievna — master's degree student, faber.cat.rina@gmail.com

ЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

М. А. Федотова¹, А. С. Петросян^{1,2}

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

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

Представлены результаты развития аналитической теории, описывающей линейные и нелинейные волны в плазменной астрофизике: обоснования и разработка различных приближений для магнитогидродинамических уравнений, описывающих эффекты стратификации и сжимаемости в течениях вращающейся астрофизической плазмы; поиск новых типов волн, вызванных непосредственно изучаемыми эффектами; исследование влияния изучаемых эффектов, а также учёта горизонтальной составляющей силы Кориолиса на магнитострофические волны, магнитные инерционно-гравитационные волны и волны магнито-Россби; качественный анализ потенциальных нелинейных взаимодействий для всех исследуемых типов волн и вывод уравнений трёхволновых взаимодействий; исследование влияния стратификации и сжимаемости на инкременты параметрических неустойчивостей, а также новые механизмы параметрических неустойчивостей с учётом новых типов волн.

Ключевые слова: сжимаемость, магнитная гидродинамика, стратификация, вращение, магнитные инерционно-гравитационные волны, магнитострофические волны, волны Россби

Обсуждаются теоретические исследования эффектов стратификации и сжимаемости в течениях вращающейся астрофизической плазмы. Исследования эффектов стратификации и сжимаемости в магнитогидродинамических моделях вращающейся астрофизической плазмы важны для анализа процессов в солнечном тахоклине, устойчиво-стратифицированных областях в недрах звёзд (излучающей зоны) и планет (внешний жидкий слой ядра), осциллирующий вращающихся звёзд и Солнца, астрофизических дисков, экзопланет. Свойство сжимаемости является принципиальным отличием течений астрофизической плазмы и характеризует большинство наблюдаемых объектов в астрофизике. Кроме того, учёт стратификации позволяет существенно расширить возможности для интерпретации имеющихся данных наблюдений крупномасштабных волн Россби на Солнце.

Показано влияние стратификации и сжимаемости на магнитострофические волны, магнитные инерционно-гравитационные волны и волны магнито-Россби в приближении двуслойной мелкой воды (Федотова и др. 2020), приближении Буссинеска (Федотова, Петросян, 2020а), неупругом приближении (Федотова, Петросян, 2020б). Кроме того, во всех трёх приближениях развита слабонелинейная теория, исследованы трёхволновые взаимодействия и найдены неустойчивости типа распад и усиление.

В рамках приближения двуслойной мелкой воды были обнаружены волны магнито-Пуанкаре на β -плоскости (Fedotova et al., 2022), которые не были исследованы ранее. Дисперсионное соотношение для волн магнито-Пуанкаре на бета-плоскости в вертикальном магнитном поле с учётом эффектов стратификации в рамках приближения двуслойной мелкой воды имеет следующий вид:

Федотова Мария Андреевна — аспирантка, fedotova.maria.04@gmail.com

Петросян Аракек Саркисович — профессор, доктор физико-математических наук

$$\begin{aligned} \omega_{MP_v} + \delta_{MP_v} = & \pm \sqrt{\frac{B_0^2}{h_{01}^2} + \frac{B_0^2}{\Delta h_0^2} + f_0^2 + gk^2 h_{02}} + \frac{1}{2} \left(\frac{B_0^2}{h_{01}^2} + \frac{B_0^2}{\Delta h_0^2} + f_0^2 + gk^2 h_{02} \right) \pm \\ & \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{B_0^2}{h_{01}^2} + \frac{B_0^2}{\Delta h_0^2} + f_0^2 + gk^2 h_{02} \right)^2 - \frac{\Phi_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}, \omega_{MP_v} \right)}{\left(\omega_{MP_v}^2 - \omega_1^2 \right) \cdot \left(\omega_{MP_v}^2 - \omega_2^2 \right)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где B_0 — внешнее вертикальное магнитное поле; $h_{02} = h_{01} + \Delta h_0$, h_{01} — высота нижнего слоя с постоянной плотностью ρ_1 , Δh_0 — высота верхнего слоя с постоянной плотностью ρ_2 ; f_0 — постоянная вертикальная компонента вектора Кориолиса (первое слагаемое в разложении вектора Кориолиса в ряд в приближении β -плоскости); g — ускорение свободного падения, $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ — волновой вектор;

$$\Phi_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}, \omega_{MP_v} \right) = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) g^2 k^4 h_{01} \Delta h_0 \left(\omega_{MP_v}^2 + \frac{\beta k_x}{k^2} \omega_{MP_v} + \frac{B_0^2}{h_{01}^2} \right) \cdot \left(\omega_{MP_v}^2 + \frac{\beta k_x}{k^2} \omega_{MP_v} + \frac{B_0^2}{\Delta h_0^2} \right), \quad (2)$$

где $\beta = \partial f / \partial y$ — параметр описывающий эффекты стратификации в приближении β -плоскости; βy — второе слагаемое в разложении вектора Кориолиса в ряд в приближении β -плоскости, $\beta y \ll f_0$,

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{B_0^2}{h_{01}^2} + \frac{B_0^2}{\Delta h_0^2} + f_0^2 \pm \sqrt{\left(\frac{B_0^2}{h_{01}^2} - \frac{B_0^2}{\Delta h_0^2} \right)^2 + f_0^2 \left(\frac{2B_0^2}{h_{01}^2} + \frac{2B_0^2}{\Delta h_0^2} + f_0^2 \right)} \right).$$

Дисперсионное соотношение для волн магнито-Пуанкаре на бета-плоскости в вертикальном магнитном поле с учётом эффектов стратификации в рамках приближения двуслойной мелкой воды имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \omega_{MP_h} + \delta_{MP_h} = & \pm \sqrt{2(\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^2 + f_0^2 + gk^2 h_{02}} + \frac{1}{2} \left(2(\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^2 + f_0^2 + gk^2 h_{02} \right) \pm \\ & \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(2(\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^2 + f_0^2 + gk^2 h_{02} \right)^2 - \frac{\Phi_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}, \omega_{MP_h} \right)}{\left(\omega_{MP_h}^2 - \omega_3^2 \right) \cdot \left(\omega_{MP_h}^2 - \omega_4^2 \right)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $(\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k}) = B_{0x} k_x + B_{0y} k_y$ — скалярное произведение горизонтального магнитного поля в состоянии покоя на волновой вектор;

$$\Phi_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}, \omega_{MP_h} \right) = \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) g^2 k^2 h_{01} \Delta h_0 \left[k^2 \omega_{MP_h}^4 - 2\beta k_x \omega_{MP_h}^3 + 2(\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^2 k^2 \omega_{MP_h}^2 + 2(\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^2 \beta k_x \omega_{MP_h} - (\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^4 \right], \quad (4)$$

где

$$\omega_{3,4}^2 = \frac{f_0^2}{2} + (\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^2 \pm f_0 \sqrt{\frac{f_0^2}{4} + (\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k})^2}.$$

Отметим здесь существенное различие с волнами магнито-Пуанкаре на f -плоскости. Дисперсионные соотношения (1), (3) имеют более простой вид,

в них отсутствуют дополнительные внутренние радикалы, что меняет динамику волны. Кроме того, полное дисперсионное уравнение на β -плоскости во внешнем вертикальном магнитном поле и в горизонтальном магнитном поле в магнитогидродинамической модели двуслойной мелкой воды для вращающейся стратифицированной астрофизической плазмы не имеет решения в виде магнитострофических волн.

Отметим также, что в отличие от стандартных волн магнито-Пуанкаре на f -плоскости для найденных волн магнито-Пуанкаре на β -плоскости не выполняются условия синхронизма для их трёхволнового взаимодействия как во внешнем вертикальном, так и в горизонтальном магнитном поле.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис».

ЛИТЕРАТУРА

- Федотова М. А., Петросян А. С.* (2020а) Волновые процессы в трехмерных стратифицированных течениях вращающейся плазмы в приближении Буссинеска // Журн. эксперим. и теорет. физики. 2020. Т. 158. № 2. С. 374–394. DOI: 10.31857/S0044451020080155.
- Федотова М. А., Петросян А. С.* (2022б) Волновые процессы во вращающихся сжимаемых течениях астрофизической плазмы с устойчивой стратификацией // Журн. эксперим. и теорет. физики. 2020. Т. 158. № 6. С. 1188–1214. DOI: 10.31857/S0044451020120172.
- Федотова М. А., Климачков Д. А., Петросян А. С.* Магнитогидродинамическая теория мелкой воды для течений стратифицированной вращающейся астрофизической плазмы. Приближение бета-плоскости, магнитные волны Россби // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 1. С. 57–71. DOI: 10.31857/S0367292120010072.
- Fedotova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S.* Resonant interactions of magneto-Poincaré and magneto-Rossby waves in quasi-two-dimensional rotating astrophysical plasma // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. V. 509. Iss. 1. P. 314–326. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2957>.

LINEAR WAVES AND NONLINEAR EFFECTS IN STRATIFIED ASTROPHYSICAL PLASMA

*M. A. Fedotova*¹, *A. S. Petrosyan*^{1,2}

¹ Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

The results of the development of the analytical theory describing linear and nonlinear waves in plasma astrophysics are presented: substantiation and development of various approximations for magnetohydrodynamic equations describing the effects of stratification and compressibility in rotating astrophysical plasma flows; search for new types of waves caused directly by the studied effects; investigation of the influence of the studied effects, as well as taking into account the horizontal component of the Coriolis force on magnetostrophic waves, magnetic inertia-gravity waves and magneto-Rossby waves; qualitative analysis of potential nonlinear interactions for all studied types of waves and derivation of equations for three-wave interactions; study of the influence of stratification and compressibility on the increments of parametric instabilities, as well as new mechanisms of parametric instabilities, taking into account new types of waves.

Keywords: compressibility, magnetohydrodynamics, stratification, rotation, magnetic inertia-gravity waves, magnetostrophic waves, Rossby waves

Fedotova Maria Andreevna — postgraduate, fedotova.maria.04@gmail.com

Petrosyan Arakel Sarkisovich — professor, doctor of physical and mathematical sciences

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСАХ МАССЫ НА СРЕДНИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБАХ

А. А. Хохлачев, М. О. Рязанцева, Ю. И. Ермолаев, Л. С. Рахманова, И. Г. Лодкина

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

Работа посвящена анализу связи изменений относительного содержания гелия и ряда параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля внутри межпланетных проявлений корональных выбросов массы. Ранее двумя независимыми методами было выявлено, что на пространственных масштабах $\sim 10^7$ км внутри корональных выбросов массы наблюдается антикорреляция содержания гелия и плазменного параметра β , и было высказано предположение о существовании электрического тока, обогащённого ионами гелия, с характерными размерами $\sim 10^6$ км. В настоящей работе связь между указанными выше параметрами исследуется на меньших масштабах: 10^5 – 10^6 км. Показано, что на данных масштабах не прослеживается однозначная антикорреляция содержания гелия и параметра β . Выявлено существование локальных областей, в которых увеличение содержания гелия наблюдается одновременно с ростом либо со спадом величины межпланетного магнитного поля. При этом события со значимой положительной и отрицательной корреляцией содержания гелия и величины магнитного поля приблизительно равновероятны и суммарно наблюдаются в $\sim 10\%$ случаев. Для таких структур, как правило, величина магнитного поля антикоррелирует с тепловым давлением, т.е. имеется тенденция к сохранению баланса давлений на границах структур. Таким образом, внутри корональных выбросов массы можно выявить более тонкие структуры, которые могут указывать на существование тока с повышенным содержанием гелия на средних масштабах, аналогичного крупномасштабному току. Однако подобные структуры встречаются сравнительно редко.

Ключевые слова: солнечный ветер, межпланетная плазма, дважды ионизированные ионы гелия, межпланетные выбросы корональной массы, космические исследования

В потоке солнечного ветра (СВ) можно выделить несколько основных крупномасштабных типов течений, в которых значения параметров плазмы и межпланетного магнитного поля (ММП) могут значительно различаться (см. например (Ермолаев и др., 2009; Kilpua et al., 2015; Schwenn, 2007)). Одним из наиболее ярких и геоэффективных типов СВ выступают межпланетные проявления корональных выбросов массы ICME (*англ.* Interplanetary Coronal Mass Ejections) (Gopalswamy et al., 2015; Temmer, 2021; Yermolaev et al., 2010). Считается, что ICME включает в себя два типа событий: магнитные облака MC (*англ.* Magnetic Cloud), обладающие более высоким и регулярным магнитным полем, и EJECTA, в которых ММП ниже по величине и подвержено более сильным вариациям. Методика классификации типов течений СВ по локальным данным на орбите Земли подробно описана в работе (Ермолаев и др., 2009).

По сравнению с медленными типами течений для ICME свойственно более высокое содержание дважды ионизированных ионов гелия He^{++} (альфа-частиц)

Хохлачев Александр Андреевич — инженер, аспирант, aleks.xaa@yandex.ru

Рязанцева Мария Олеговна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Ермолаев Юрий Иванович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук

Рахманова Людмила Сергеевна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Лодкина Ирина Григорьевна — ведущий программист

(Feldman et al., 1978; Hirshberg et al., 1972; Yermolaev, Stupin, 1997). Эти ионы являются второй по распространённости ионной компонентой солнечного ветра после протонов. Отношение плотностей протонной и гелиевой компонент — относительное содержание гелия N_{α}/N_p — считается одним из важных параметров состояния плазмы СВ (Geiss, 1982).

Течение солнечного ветра неламинарно, в нём наблюдаются вариации физических свойств. На больших масштабах ($>10^6$ км) вариации параметров плазмы и межпланетного магнитного поля связаны с различными крупномасштабными проявлениями неоднородностей солнечной короны, например, корональными выбросами массы, корональными дырами или стримерами (Schwenn, 2007). На средних масштабах (10^5 – 10^6 км) параметры также могут значительно варьировать, что может быть связано с наблюдением альфвеновских волн, потоковых трубок или других магнитогиродинамических структур (Bavassano, 1994; Vovovskiy, 2008; Bruno et al., 2001; Owens et al., 2011; Tu, Marsch, 1995). Средне-масштабные структуры, как правило, также зарождаются на Солнце. Например, в работе (Vovovskiy, 2008) было показано, что наблюдаемые в СВ потоковые трубки соответствуют масштабам гранул на поверхности Солнца. Вариации на меньших масштабах оказываются проявлением локальных процессов в плазме.

В прошлых работах (Хохлачев и др., 2022; Yermolaev et al., 2020) мы рассматривали поведение параметров плазмы СВ и ММП (в частности, относительного содержания гелия) внутри ICME на основе среднечасовых данных из базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Использование данных с таким временным разрешением позволило выявить общие тенденции внутри ICME на больших пространственных масштабах ($>10^6$ км). Следует отметить, что на околоземной орбите длительность ICME составляет от нескольких часов до нескольких суток (в среднем ~ 30 ч), а средняя скорость — около 400 км/с, т. е. характерный пространственный масштаб ICME составляет $\sim 10^7$ км. Результаты вышеупомянутых работ показали следующее: во-первых, внутри ICME наблюдается рост относительного содержания гелия при уменьшении плазменного параметра β , что было интерпретировано как указание на существование электрического тока, обогащённого ионами гелия. Во-вторых, эта зависимость связана с положительной корреляцией между содержанием гелия и величиной межпланетного магнитного поля, при этом не было обнаружено однозначной зависимости содержания гелия от теплового давления.

В настоящей работе исследуются изменения параметров плазмы, в том числе содержания гелия, и магнитного поля на средних пространственных масштабах от 10^5 до 10^6 км внутри ICME. Для анализа использовались данные приборов 3DP (*англ.* Three-Dimensional Plasma Analyzer) (Lin et al., 1995) и MFI (*англ.* Magnetic Fields Investigation) (Lepping et al., 1995) космического аппарата Wind с временным разрешением 3 с. События МС и EJECTA отбирались на основе каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>). Анализировался временной ход параметров во время пересечения космическим аппаратом магнитных облаков и событий EJECTA, и проводился корреляционный анализ между различными парами параметров.

На рис. 1 представлен пример временного хода параметров на интервале, содержащем магнитное облако, которое длится с 16:00 UT (*англ.* Universal Time) 14.04.2013 по 14:00 UT 15.04.2013. На верхних панелях показан временной ход параметров на этом интервале: относительного содержания гелия N_{α}/N_p (см. рис. 1а) и величины ММП B (см. рис. 1б). После пересечения границы магнитного облака, которая на рисунке обозначена вертикальной линией, наблюдается рост содержания гелия и величины магнитного поля, которое слабо варьирует, что характерно для МС. В целом, на протяжении данного события видна тенденция к положительной корреляции между этими параметрами. При этом

коэффициент корреляции $R_{MC}(N_{\alpha}/N_p, B)$ составляет 0,8, однако следует отметить, что внутри MC содержание гелия сильно варьирует на масштабах $<10^6$ км.

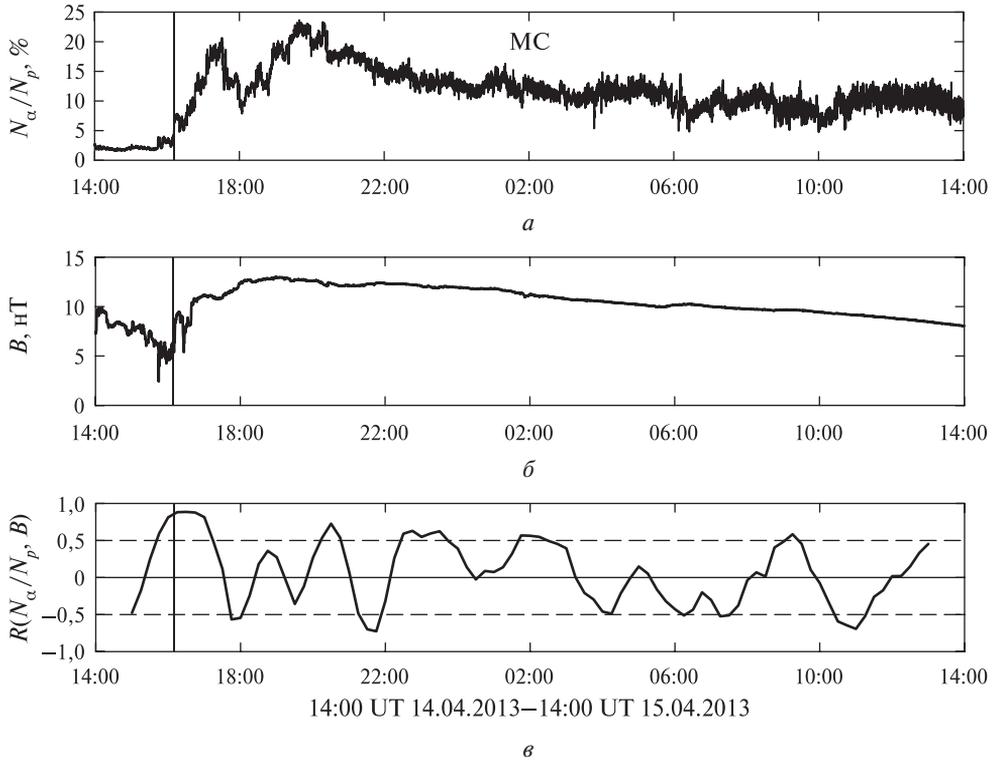


Рис. 1. Динамика относительного содержания гелия (а), величины межпланетного магнитного поля (б) и рассчитанного на коротких интервалах коэффициента корреляции между этими параметрами (в) на интервале 14:00 UT 14.04.2013–14:00 UT 15.04.2013. Вертикальная линия обозначает границу начала MC

Для анализа вариаций параметров на структурах меньших масштабов ($<10^6$ км) было проведено разделение исследуемых временных интервалов на более короткие. В примере, представленном на рис. 1, рассматриваемое событие было разбито для более наглядной демонстрации на двухчасовые интервалы. Чтобы избежать потери данных на границах, интервалы сдвигались относительно друг друга на 15 мин. Для каждого интервала отдельно рассчитывался коэффициент корреляции $R(N_{\alpha}/N_p, B)$ между временными рядами содержания гелия и величины ММП. На рис. 1в показано изменение вычисленного коэффициента корреляции с течением времени. Его величина сильно варьирует и может принимать как значимые положительные, так и отрицательные значения.

Таким образом, в MC относительное содержание гелия коррелирует с величиной межпланетного магнитного поля лишь в среднем на крупных масштабах, а на средних масштабах (10^5 – 10^6 км) существует множество структур, в которых между этими двумя параметрами может наблюдаться как положительная, так и отрицательная корреляция.

Для того чтобы выявить статистическую связь между содержанием гелия и другими параметрами плазмы и ММП на исследуемых масштабах внутри ICME было отобрано 149 MC и 969 EJECTA за период с 1995 по 2020 г.

Аналогично описанной выше методике, временные ряды параметров отобранных событий были разделены на короткие интервалы. При средней скорости 400 км/с двухчасовой интервал соответствует пространственному масштабу $\sim 3 \cdot 10^6$ км. Чтобы выделять границы структур масштабов $10^5 - 10^6$ км более точно, для дальнейшего статистического анализа были использованы интервалы часовой длительности. Сдвиг между интервалами составил 15 мин. Для каждого из интервалов были рассчитаны коэффициенты корреляции R между временными рядами содержания гелия N_α/N_p и одного из следующих параметров: плазменного параметра β , величины ММП B , теплового давления $N_p kT$, плотности N_p и температуры T протонов. Таким образом, для каждой пары параметров были вычислены коэффициенты корреляций для 14 100 интервалов в МС и 77 150 интервалов в ЕЈЕСТА.

Статистическое распределение величин соответствующих коэффициентов корреляции для интервалов внутри МС показано на рис. 2. Аналогичное распределение для ЕЈЕСТА имеет схожий вид, поэтому в данной работе не приводятся. Видно, что распределения $R(N_\alpha/N_p, \beta)$, $R(N_\alpha/N_p, B)$, $R(N_\alpha/N_p, N_p kT)$, $R(N_\alpha/N_p, T)$ близки к симметричным. При этом медианные значения R близки к нулю: например, медиана $R(N_\alpha/N_p, B)$ равна $-0,05$, а медиана $R(N_\alpha/N_p, N_p kT)$ составляет $-0,01$. Поскольку относительное содержание гелия — это отношение плотности гелия к плотности протонов, распределение $R(N_\alpha/N_p, N_p)$ смещено в сторону отрицательных значений (т.е. вероятность высокого содержания гелия повышается для малых значений плотности протонов и понижается для высоких значений плотности протонов). Однако следует отметить, что все распределения на рис. 2 имеют широкую форму и для всех пар параметров наблюдаются случаи со значимой положительной корреляцией ($R \geq 0,6$) или значимой отрицательной ($R \leq -0,6$). Например, для корреляции содержания гелия и величины магнитного поля доля случаев с $R \geq 0,6$ для МС составляет $\sim 4\%$, а с $R \leq -0,6$ — около 7% .

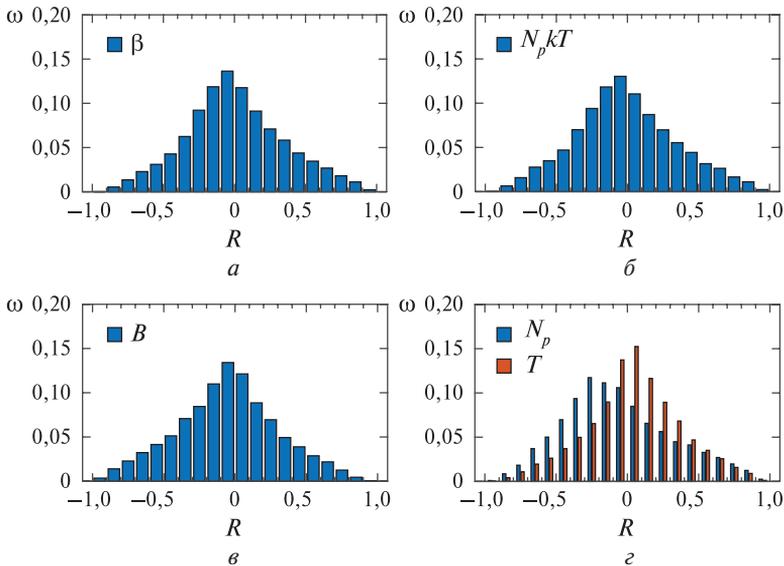


Рис. 2. Статистическое распределение коэффициентов корреляции R между содержанием гелия и другими параметрами: *а* — плазменным параметром β ; *б* — тепловым давлением; *в* — величиной ММП; *г* — плотностью (синие бины) и температурой (красные бины) протонов для интервалов внутри МС. По оси ординат отложена вероятность ω

Ниже рассмотрены два интервала, на которых модуль коэффициента корреляции $R(N_{\alpha}/N_p, B)$ принимает высокие значения. На рис. 3 и 4 показан временной ход параметров на этих интервалах: содержания гелия N_{α}/N_p , параметра β , величины ММП B , теплового давления $N_p kT$, а также плотности протонов N_p и гелия N_{α} . Интервал 12:15–13:15 UT, представленный на рис. 3, находится внутри события ЕЖЕСТА, которое наблюдалось с 05:00 UT 08.10.2011 по 14:00 UT 08.10.2011. Величины коэффициентов корреляции между содержанием гелия и другими параметрами — параметром β , величиной ММП, тепловым давлением — принимают следующие значения: $R(N_{\alpha}/N_p, \beta) = -0,74$, $R(N_{\alpha}/N_p, B) = 0,82$, $R(N_{\alpha}/N_p, N_p kT) = -0,43$. Таким образом, на данном интервале наблюдается ситуация, которая аналогична изменениям в ICME на больших масштабах: относительное содержание гелия коррелирует с величиной магнитного поля (Хохлачев и др., 2022). В выделенной области на рис. 3 хорошо виден рост содержания гелия, который происходит за счёт увеличения его плотности, на фоне увеличения модуля ММП. Также нужно отметить антикорреляцию между величиной магнитного поля и тепловым давлением $R(B, N_p kT) = -0,59$, что указывает на тенденцию к сохранению баланса теплового и магнитного давления на границах этой среднemasштабной структуры.

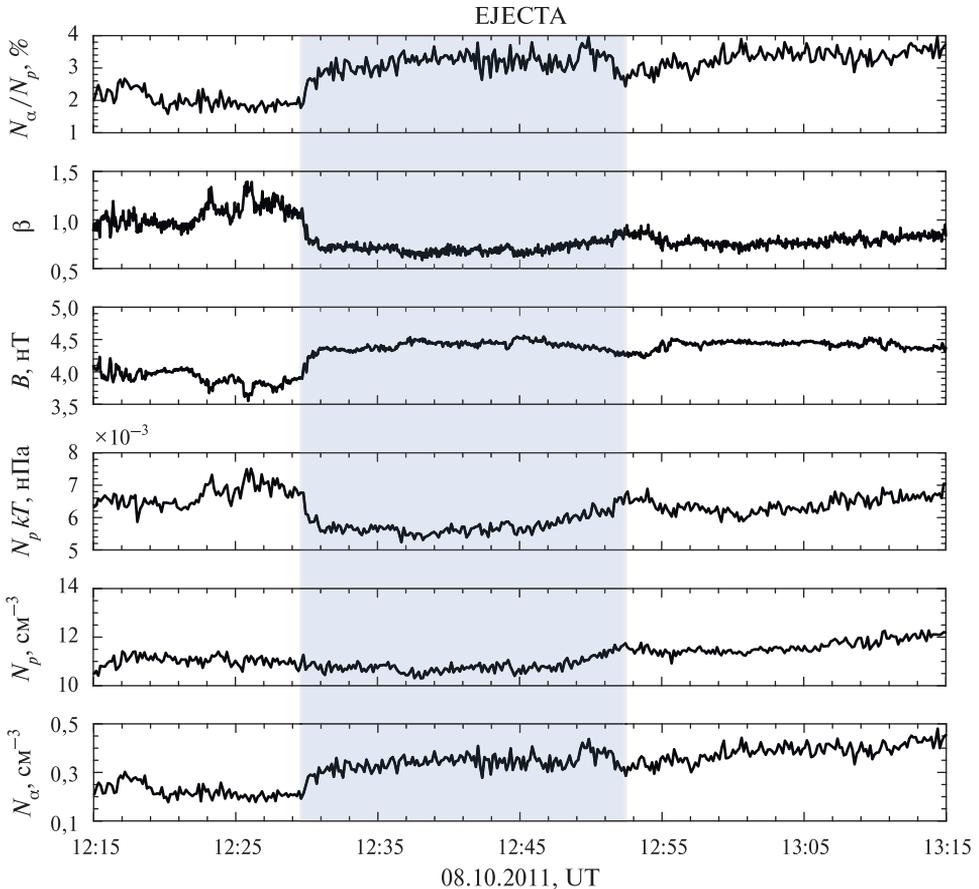


Рис. 3. Динамика параметров на интервале внутри события ЕЖЕСТА. Выделена область со среднemasштабной структурой размером $\sim 5 \cdot 10^5$ км

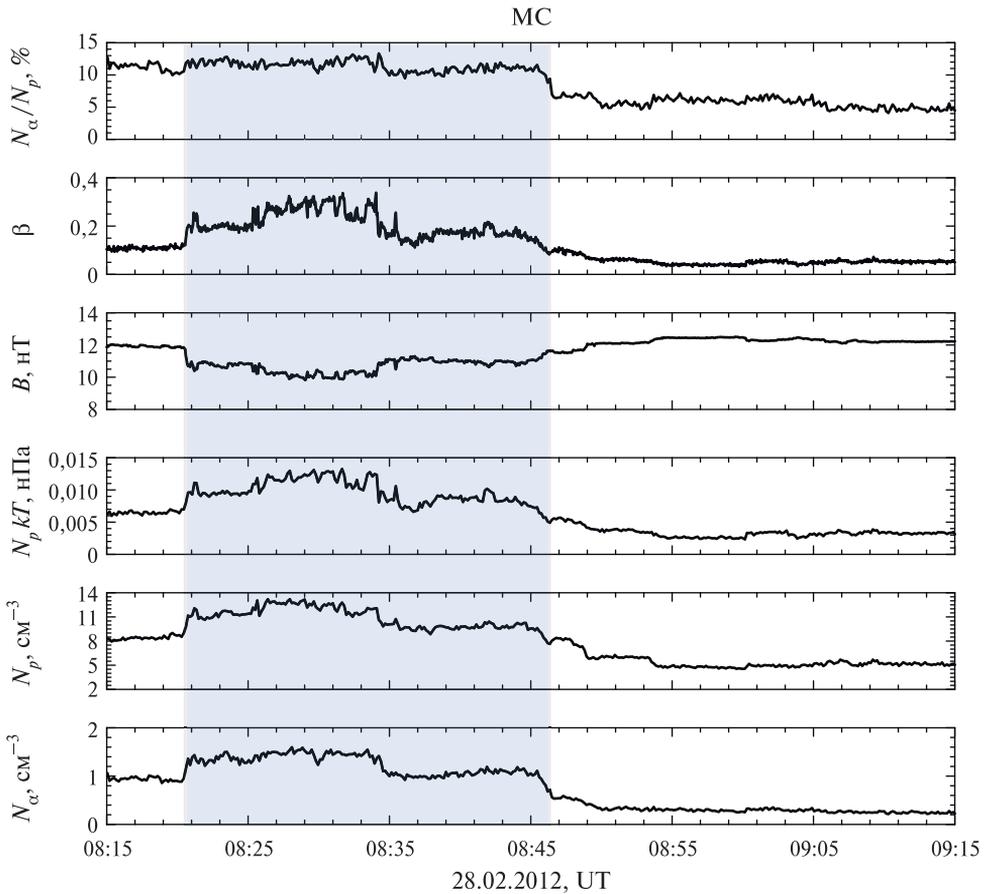


Рис. 4. Динамика параметров на интервале внутри события MC. Выделена область со среднемасштабной структурой размером $\sim 6 \cdot 10^5$ км

На рис. 4 показан интервал с 08:15 по 09:15 UT, 28.02.2012, наблюдающийся внутри магнитного облака 19:00 UT 27.02.2012–11:00 UT 28.02.2012. На данном интервале значения коэффициентов корреляции принимают следующие значения: $R(N_\alpha/N_p, \beta) = 0,82$, $R(N_\alpha/N_p, B) = -0,82$, $R(N_\alpha/N_p, N_p kT) = 0,87$. Другими словами, на данном интервале отсутствует тенденция к корреляции между содержанием гелия и величиной магнитного поля, которая характерна для крупномасштабной структуры ICME (Хохлачев и др., 2022). В выделенной цветом области на рисунке видно, что содержание гелия растёт одновременно с уменьшением величины магнитного поля. При этом для этого интервала также характерна высокая антикорреляция давлений — значение коэффициента корреляции между B и $N_p kT$ составляет $-0,97$, т.е. на границах структуры существует тенденция к сохранению баланса давлений.

Рассмотренные примеры свидетельствуют, что увеличение относительного содержания гелия в структурах масштабов 10^5 – 10^6 км внутри ICME может наблюдаться одновременно как с ростом, так и со спадом величины межпланетного магнитного поля на фоне общей тенденции к антикорреляции магнитного и теплового давлений, свидетельствующей о сохранении баланса давлений на границах среднемасштабных структур.

В заключение выделим основные результаты, полученные в ходе работы. На среднемасштабных структурах внутри ICME может наблюдаться локальная корреляция содержания гелия и модуля ММП на фоне роста величины магнитного поля — другими словами, можно предположить, что существуют среднемасштабные токовые структуры, аналогичные обогащённому ионами гелия крупномасштабному электрическому току в центральной области ICME (Yermolaev et al., 2020). Подобные случаи встречаются сравнительно редко, и примерно с такой же вероятностью могут наблюдаться случаи с антикорреляцией содержания гелия и величины магнитного поля. В среднем на масштабах 10^5 – 10^6 км внутри ICME не наблюдается корреляции между содержанием гелия и величиной магнитного поля, плазменным параметром β или тепловым давлением.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-12-00227.

ЛИТЕРАТУРА

- Ермолаев Ю. И., Николаева Н. С., Лодкина И. Г., Ермолаев М. Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113.
- Хохлачев А. А., Ермолаев Ю. И., Лодкина И. Г., Рязанцева М. О., Рахманова Л. С. Вариации содержания гелия в межпланетных выбросах корональной массы (ICME) // *Космич. исслед.* 2022. Т. 60. № 2. С. 93–98.
- Bavassano B. Recent observations of MHD fluctuations in the solar wind // *Annales Geophysicae*. 1994. V. 12. P. 97–104.
- Borovsky J. E. Flux tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. Iss. A08. Art. No. A08110. 25 p. <https://doi.org/10.1029/2007JA012684>.
- Bruno R., Carbone V., Veltri P., Pietropaolo E., Bavassano B. Identifying intermittency events in the solar wind // *Planetary and Space Science*. 2001. V. 49. Iss. 12. P. 1201–1210. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(01\)00061-7](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(01)00061-7).
- Feldman W. C., Asbridge J. R., Bame S. J., Gosling J. T. Long-term variations of selected solar wind properties: IMP 6, 7 and 8 results // *J. Geophysical Research*. 1978. V. 83. Iss. 5. P. 2177–2189.
- Geiss J. Processes affecting abundances in the solar wind // *Space Science Reviews*. 1982. V. 33. P. 201–217.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Xie H., Akiyama S., Mäkelä P. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24 // *J. Geophysical Research*. 2015. V. 120. Iss. 11. P. 9221–9245. <https://doi.org/10.1002/2015JA021446>.
- Hirshberg J., Bame S. J., Robbins D. E. Solar flares and solar wind helium enrichments: July 1965–July 1967 // *Solar Physics*. 1972. V. 23. P. 467–486.
- Kilpua E. K. J., Hietala H., Turner D. L., Koskinen H. E. J., Pulkkinen T. I., Rodriguez J. V., Reeves G. D., Claudepierre S. G., Spence H. E. Unraveling the drivers of the storm time radiation belt response // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. Iss. 9. P. 3076–3084. <https://doi.org/10.1002/2015GL063542>.
- Lepping R. P., Acuna M. H., Burlaga L. F., Farrell W. M., Slavin J. A., Schatten K. H., Mariani F., Ness N. F., Neubauer F. M., Whang Y. C., Byrnes J. B., Kennon R. S., Panetta P. V., Scheifele J., Worley E. M. The WIND magnetic field investigation // *Space Science Reviews*. 1995. V. 71. P. 207–229.
- Lin R. P., Anderson K. A., Ashford S., Carlson C., Curtis D., Ergun R., Larson D., McFadden J., McCarthy M., Parks G. K., Rème H., Bosqued J. M., Coutelier J., Cotin F., D’Uston C., Wenzel K.-P., Sanderson T. R., Henrion J., Ronnet J. C., Paschmann G. A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the wind spacecraft // *Space Science Reviews*. 1995. V. 71. P. 125–153.

- Owens M. J., Wicks R. T., Horbury T. S. Magnetic Discontinuities in the Near-Earth Solar Wind: Evidence of In-Transit Turbulence or Remnants of Coronal Structure? // *Solar Physics*. 2011. V. 269. P. 411–420. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9695-0>.
- Schwenn R. Solar Wind Sources and Their Variations over the Solar Cycle // *Solar Dynamics and Its Effects on the Heliosphere and Earth* / eds. Baker D. N., Klecker B., Schwartz S. J., Schwenn R., Steiger R. Space Sciences Series of ISSI. V. 22. N. Y.: Springer, 2007. P. 51–76.
- Temmer M. Space weather: the solar perspective // *Living Reviews in Solar Physics*. 2021. V. 18. Iss. 4. 81 p. <https://doi.org/10.1007/s41116-021-00030-3>.
- Tu C.-Y., Marsch E. MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: observations and theories // *Space Science Reviews*. 1995. V. 73. 210 p. <https://doi.org/10.1007/BF00748891>.
- Yermolaev Yu. I., Stupin V. V. Helium abundance and dynamics in different types of solar wind streams: The Prognoz 7 observations // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. Iss. A2. P. 2125–2136. <https://doi.org/10.1029/96JA01635>.
- Yermolaev Yu. I., Nikolaeva N. S., Lodkina I. G., Yermolaev M. Yu. Large-scale solar wind structures: occurrence rate and geoeffectiveness // 12th Intern. Solar Wind Conf.: AIP Conf. Proc. 2010. V. 1216. P. 648–651. DOI: 10.1063/1.3395949.
- Yermolaev Yu. I., Lodkina I. G., Yermolaev M. Yu., Riazantseva M. O., Rakhmanova L. S., Borodkova N. L., Shugay Y. S., Slemzin V. A., Veselovsky I. S., Rodkin D. G. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis: 4. Helium abundance // *J. Geophysical Research*. 2020. V. 125. Iss. 7. Art. No. e2020JA027878. <https://doi.org/10.1029/2020JA027878>.

HELIUM ABUNDANCE VARIABILITY IN THE CORONAL MASS EJECTIONS ON MEDIUM SPATIAL SCALES

A. A. Khokhlachev, M. O. Riazantseva, Yu. I. Yermolaev, L. S. Rakhmanova, I. G. Lodkina

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

The study concerns to the relationship between changes in the relative helium abundance and a behaviour of the solar wind plasma and the interplanetary magnetic field parameters inside the interplanetary coronal mass ejections. Previously, two independent methods revealed that on spatial scales $\sim 10^7$ km inside the coronal mass ejections the anticorrelation between the helium abundance and the plasma parameter β is observed. It was suggested that there is an electric current enriched with helium ions with characteristic size of $\sim 10^6$ km. In this paper, the relationship between the above parameters is investigated on a smaller scale: 10^5 – 10^6 km. It is shown that there is no unambiguous anticorrelation between the helium abundance and the parameter β on these scales. The existence of local regions in which the helium abundance increases simultaneously with an increase or decrease in the interplanetary magnetic field magnitude is revealed. The events with significant positive and negative correlation of the helium abundance and the magnitude of the magnetic field have approximately equal probability and are observed in total in ~ 10 % of cases. For such structures, the magnitude of the magnetic field and thermal pressure anticorrelate rather often, i.e. the tendency to maintain the pressure balance at the boundaries of the structures is observed. Thus, finer structures can be revealed inside coronal mass ejections that may indicate the existence of a current with increased helium abundance on medium scales, similar to a large-scale current. However, such structures are relatively rare.

Keywords: solar wind, interplanetary plasma, doubly ionized helium ions, interplanetary coronal mass ejections, space research

Khokhlachev Alexander Andreevich — engineer, postgraduate, aleks.xaa@yandex.ru
Riazantseva Maria Olegovna — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Yermolaev Yuri Ivanovich — leading researcher, doctor of physical and mathematical sciences

Rakhmanova Liudmila Sergeevna — researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Lodkina Irina Grigorievna — leading programmer

СВЕРХКОРОТКИЙ РАДИОИМПУЛЬС С ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ НА МЕЖПЛАНЕТНОЙ ТРАССЕ

Ю. С. Худышев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ФИРЭ РАН), Фрязино, Россия

Рассмотрены характер и возможные особенности процесса распространения сверхкороткого синусоидального радиоимпульса с частотной манипуляцией в бесстолкновительной плазменной среде на трассах с интегральным электронным содержанием (ТЕС), соответствующим межпланетным расстояниям. Показано, что при достаточно больших величинах ТЕС изменения напряжённости поля во времени на входе в среду и на приёмном конце трассы могут принципиально различаться, а временной ход мгновенной частоты колебаний поля характеризуется его убыванием, близким к монотонному. При этом вид автокорреляционных функций деформированных импульсов с увеличением ТЕС сохраняется. Показано также, что особенности временных вариаций принимаемого поля могут быть априори ожидаемыми на основе предварительного анализа амплитудного спектра излучаемого импульса.

Ключевые слова: синусоидальный радиоимпульс, частотная манипуляция, мгновенная частота, дисперсионные искажения, межпланетная плазма

ВВЕДЕНИЕ

Фазовая и частотная манипуляции широко применяются в системах радиосвязи с целью уширения спектра передаваемого сигнала и, соответственно, повышения его скрытности и возможности идентификации на фоне искусственных и естественных помех. При этом следует принимать во внимание, что распространение в природных средах при достаточно протяжённых трассах может сопровождаться значительными отличиями формы и иных характеристик принимаемых сигналов от соответствующих параметров сигналов, поступивших в среду. Эти отличия обуславливаются взаимодействием распространяющегося сигнала со средой и зависят, в том числе, от начального спектрального состава сигнала. В статье (Худышев, 2021) рассмотрены характер и возможные особенности процесса распространения сверхкороткого синусоидального радиоимпульса с фазовой манипуляцией в бесстолкновительной плазменной среде на трассах с интегральным электронным содержанием (*англ.* total electron content — ТЕС), характерным для межпланетных расстояний.

Цель настоящей работы заключается в кратком изложении результатов теоретического анализа характеристик напряжённости поля на приёмном конце трассы для случая излучаемого синусоидального радиоимпульса с частотной манипуляцией.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАЕМОГО ИМПУЛЬСА

Примем, что за время длительности $t_{\text{и}}$ излучаемого синусоидального радиоимпульса: а) напряжённость поля $E(0; t)$ совершает N полных колебаний и б) несущая частота f' претерпевает K скачков в моменты времени $t_k = (k - 1/K)t_{\text{и}}$ ($k = 1, 2, \dots, K$). Величину K далее будем называть числом частот излучаемого импульса с задаваемыми несущими. Напряжённость поля излучаемого импульса имеет вид:

Худышев Юрий Сергеевич — младший научный сотрудник, xantaresx@yandex.ru

$$E(0; t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ \sin(2\pi f'_1 t / t_{\text{и}}), & 0 \leq t \leq t_1; \\ \sin(2\pi f'_2 (t - t_1) / t_{\text{и}}), & t_1 < t \leq t_2; \\ \dots \\ \sin(2\pi f'_N (t - t_{K-1}) / t_{\text{и}}), & t_{K-1} < t \leq t_K = t_{\text{и}}; \\ 0, & t > t_{\text{и}}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь t — время; t_k — верхние временные границы отдельных частей импульса $t_1 = N_1 / f'_1 = N_1 T_1$; $t_k = N_k T_k + t_{k-1}$; T_k и N_k — период колебаний и число полных колебаний поля в пределах k -й части импульса соответственно; f'_k — несущие отдельные части импульса; $t_{\text{и}} = N_1 / f'_1 + N_2 / f'_2 + \dots + N_K / f'_K$.

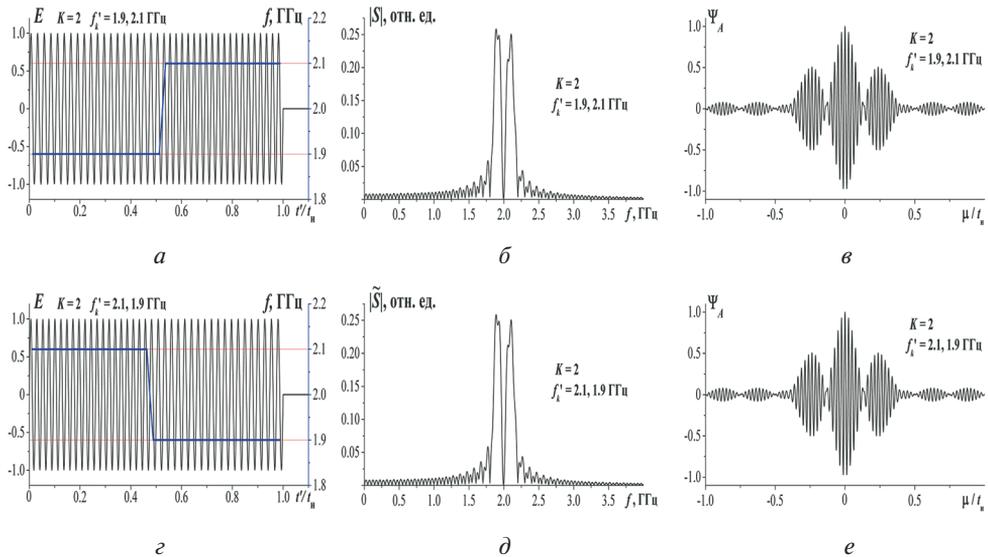


Рис. 1. Напряжённость поля и мгновенная частота (а, е); амплитудный спектр (б, д) и автокорреляционная функция (в, е) синусоидального радиоимпульса с частотной манипуляцией при $K = 2$, $N_1 = N_2 = 20$, $f'_1 = 1,9 \text{ ГГц}$ и $f'_2 = 2,1 \text{ ГГц}$ (а–в); $f'_1 = 2,1 \text{ ГГц}$ и $f'_2 = 1,9 \text{ ГГц}$ (е–е); $t_{\text{и}} = 20,05 \text{ нс}$

На рис. 1 и 2 приведены примеры временного изменения излучаемого поля $E(0; t)$ и мгновенной частоты $f(0; t)$ синусоидального импульса с частотной манипуляцией для значений $K = 2$ и $K = 4$ при $N = 40$ (величины остальных параметров см. в подписях к рисункам). Приведены также наиболее используемые в анализе характеристики импульсов: амплитудный спектр $|S|$ (рис. 1б, д, рис. 2б, д) на полуоси положительных частот и автокорреляционная функция (рис. 1в, е, рис. 2в, е):

$$\Psi_A(0; \mu) = \frac{1}{E_{\text{и}}(0)} \int_{\mu}^{\infty} E(0; t) E(0; t - \mu) dt,$$

где $E_{\text{и}}(0)$ — энергия импульса; μ — безразмерный временной сдвиг. Каждый из рисунков дан в двух вариантах, различающихся только изменённым порядком

следования частей импульсов с заданными и одинаковыми значениями их несущих (см. подписи). Ниже рассмотрены примеры распространения импульсов, изображённых на рис. 1 и 2 в бесстолкновительной плазменной среде. Здесь обратим внимание на различие в амплитудных спектрах импульсов, имеющих разное число частей. При $K = 2$ (рис. 1б, д) спектры имеют два максимума на частотах несущих частей импульсов. При $K = 4$ (рис. 2б, д) спектры формируются совокупностью максимумов, наиболее высокий из которых обусловлен когерентным сложением спектров отдельных частей и приходится на среднюю несущую частоту импульса (2,0 ГГц).

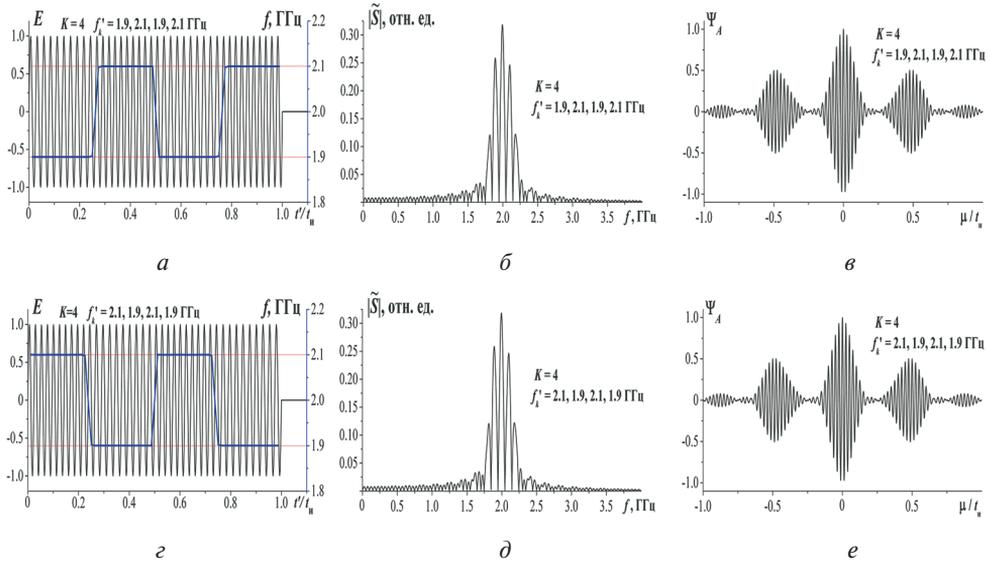


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, при $K = 4$, $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 10$, $f'_1 = f'_3 = 1,9$ ГГц и $f'_2 = f'_4 = 2,1$ ГГц (а-в); $f'_1 = f'_3 = 2,1$ ГГц и $f'_2 = f'_4 = 1,9$ ГГц (е-е); $t_{и} = 20,05$ нс

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

По прохождении межпланетной трассы напряжённость поля на приёмном конце трассы описывается выражениями (Стрелков, 2008):

при $0 \leq t' \leq t_{и}$ —

$$E(\text{TEC}; t') = E(0; t') - \int_0^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-\nu_3 \theta) \cdot E(0; t' - \theta) d\theta \quad (2)$$

и при $t' > t_{и}$ —

$$E(\text{TEC}; t') = - \int_{t'-t_{и}}^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-\nu_3 \theta) \cdot E(0; t' - \theta) d\theta. \quad (3)$$

В равенствах (2) и (3) зависимость $E(0; t')$ описывается формулой (1) и введены обозначения: $t' = t - z/c$; z — длина трассы; c — скорость света; $\delta = \delta(z) = \int \omega_0^2(z) dz / 2c$; $\omega_0^2 = 31,81 \cdot 10^8 N_e$ — квадрат плазменной частоты; N_e — электронная концентрация (см^{-3}); ν_3 — эффективная частота соударений.

Нетрудно видеть, что параметр δ прямо пропорционален величине интегрально-го электронного содержания трассы $TEC = \int N_e(z) dz \text{ м}^{-2}$.

Все приводимые ниже результаты по деформации радиоимпульсов получены с применением формул (2) и (3) в предположении бесстолкновительной плазмы ($v_s = 0$). Последнее означает, в частности, отсутствие поглощения в среде, так что энергия распространяющегося импульса

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

остаётся неизменной. Это обеспечивает возможность дополнительного контроля результатов вычислений интегралов в выражениях (2) и (3), а также адекватную оценку пределов интегрирования в формуле (3).

НАПРЯЖЁННОСТЬ И МГНОВЕННАЯ ЧАСТОТА ПОЛЯ, РЕГИСТРИРУЕМОГО НА ПРИЁМНОМ КОНЦЕ ТРАССЫ

На рис. 3–6 представлены характеристики поля, регистрируемого на приёмном конце трассы, при облучении среды синусоидальным импульсом с частотной манипуляцией при $K=2$ и $K=4$. Каждый из их фрагментов содержит временную зависимость напряжённости регистрируемого поля, отвечающую указанной величине TEC. Излучаемый импульс для рис. 3 изображён на рис. 1а. С увеличением TEC исходный импульс значительно деформируется, а по достижении некоторого значения TEC (см. рис. 3з) далее деформация проявляется в его непрерывном уширении по временной оси без видимых изменений формы импульса. Характерная особенность кривой $E(TEC; t')$ на рис. 3з — наличие двух выраженных максимумов поля. Возвращаясь к рис. 1б, видим наличие также двух максимумов в спектре $|\tilde{S}(f)|$ излучаемого импульса.

Кривые напряжённости поля на рис. 4 повторяют соответствующие кривые на рис. 3, но представлены для относительно коротких временных интервалов или, иначе, в более крупном временном масштабе. Дополнительно на фрагментах рис. 4 приведены сплошные кривые, изображающие временной ход мгновенной частоты принимаемого импульса $f(TEC; t')$. Можно видеть, что деформация поступившего в среду импульса сопровождается и деформацией кривых $f(t')$. При достаточно больших величинах TEC в пределах текущей длительности импульса мгновенная частота убывает монотонно, что соответствует спектральным представлениям о частотной зависимости скорости распространения гармоник, формирующих импульс, в холодной плазме.

Характер вариаций кривых $E(TEC; t')$ и $f(TEC; t')$ на рис. 5 и 6, соответствующих излучаемому импульсу на рис. 1з, при больших величинах TEC остаётся полностью таким же, как и на двух предыдущих рисунках. Мгновенная частота излучения снова монотонно убывает с удалением от начала импульса по временной оси (рис. 6з), а кривая поля (рис. 5з) имеет также два выраженных максимума, как и амплитудный спектр излучаемого импульса, изображённый на рис. 1д.

Количественно нарастание искажений принимаемого поля с увеличением TEC позволяют оценить данные таблицы, в которой приведены нормированные на $t_{\text{и}}$ величины центра тяжести

$$t_{\text{цт}}(TEC) = \frac{1}{E_{\text{и}}(0)} \int_0^{\infty} \tau E^2(TEC; \tau) d\tau$$

и среднеквадратической ширины

$$\Delta \bar{t}_n(\text{TEC}) = \left(\frac{1}{E_n(0)} \int_0^\infty (\bar{t}' - \bar{t}_{\text{ит}})^2 E^2(\text{TEC}; \bar{t}') d\bar{t}' \right)^{0,5}$$

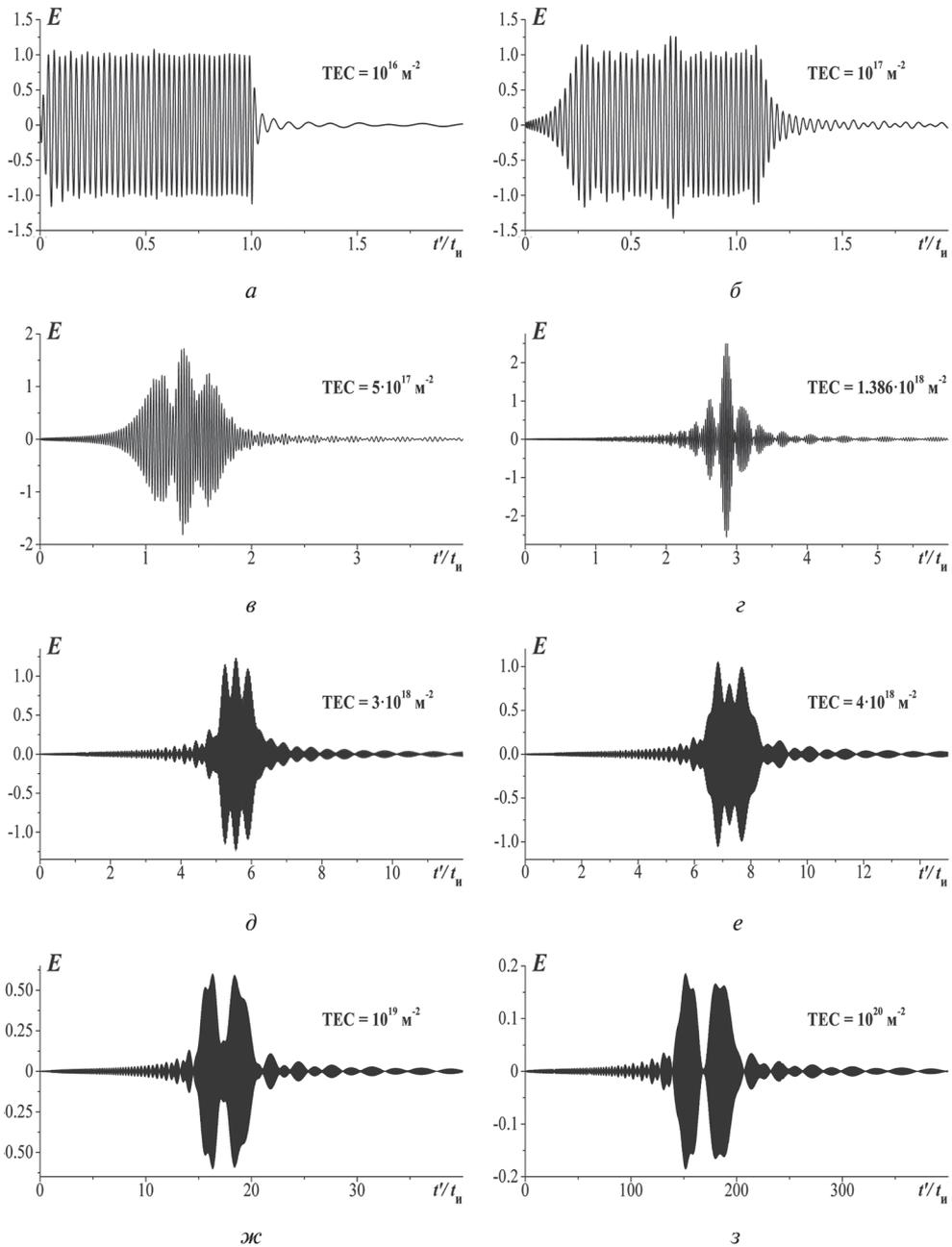


Рис. 3. Эволюция напряжённости поля импульса с увеличением TEC трассы при $K = 2$, $N_1 = N_2 = 20$, $f'_1 = 1,9$ ГГц, $f'_2 = 2,1$ ГГц, $t_n = 20,05$ нс

кривых $E(\text{TEC}; t')$, изображённых на рис. 3, 5, 8, 10 для некоторых значений TEC. Данные позволяют проследить значительное влияние TEC на численные значения характеристик и одновременно их относительно незначительные вариации при переходе от импульса на рис. 1а к импульсу на рис. 1г и от импульса на рис. 2а к импульсу на рис. 2г.

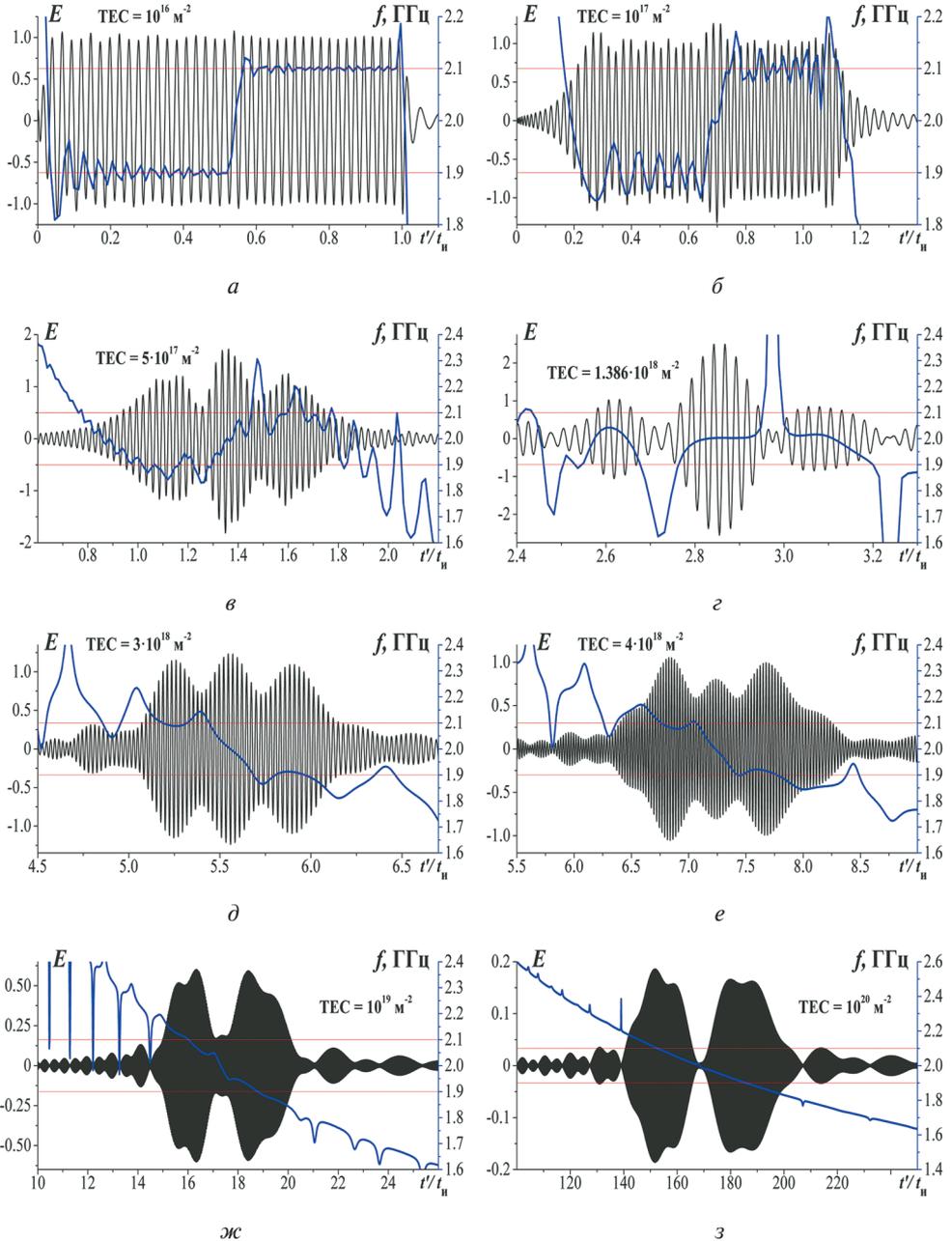


Рис. 4. Напряжённость поля и мгновенная частота радиоимпульса с частотной манипуляцией, изображённого на рис. 1а, при распространении в межпланетной плазме

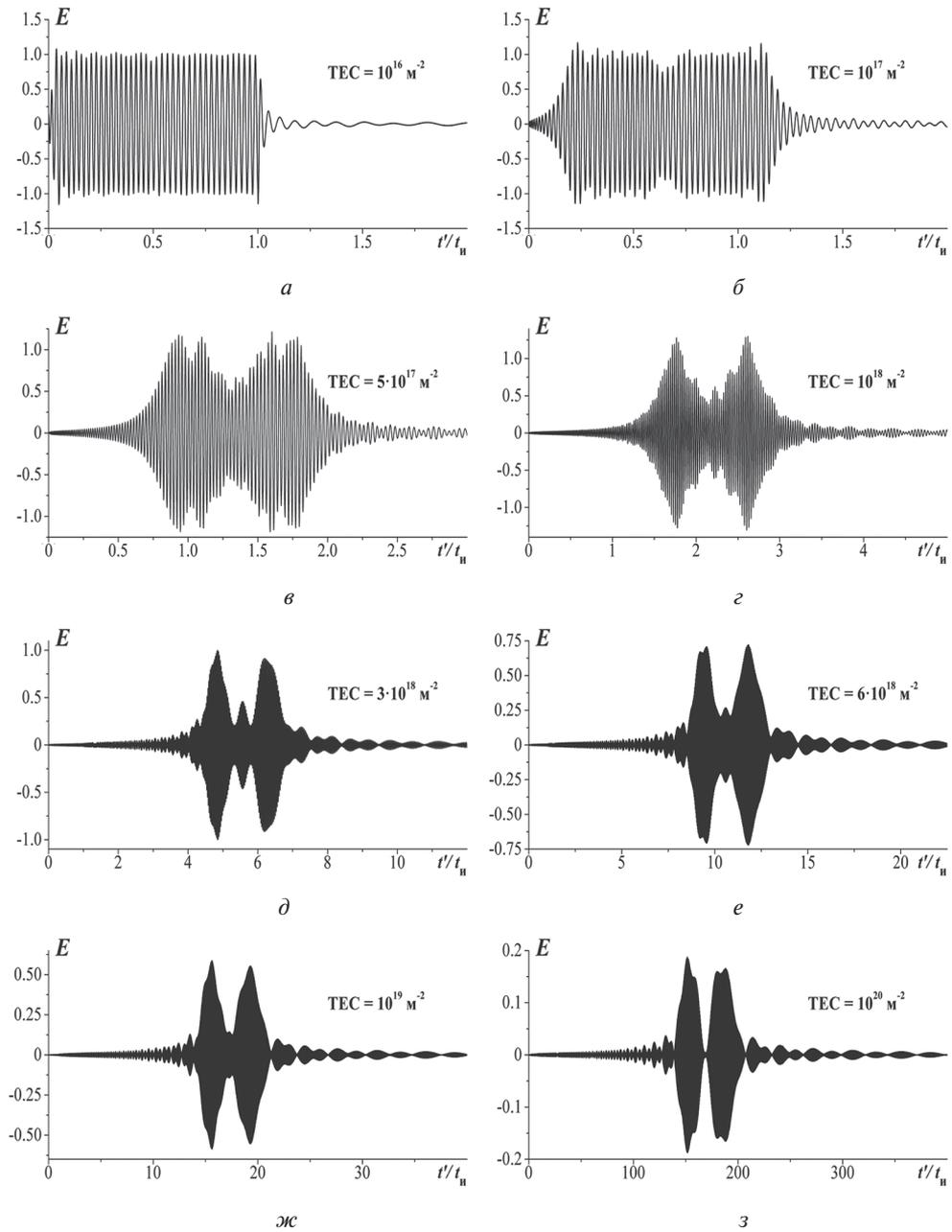


Рис. 5. Эволюция напряжённости поля импульса с увеличением TEC трассы при $K = 2$, $N_1 = N_2 = 20$, $f'_1 = 2,1 \text{ ГГц}$, $f'_2 = 1,9 \text{ ГГц}$, $t_n = 20,05 \text{ нс}$

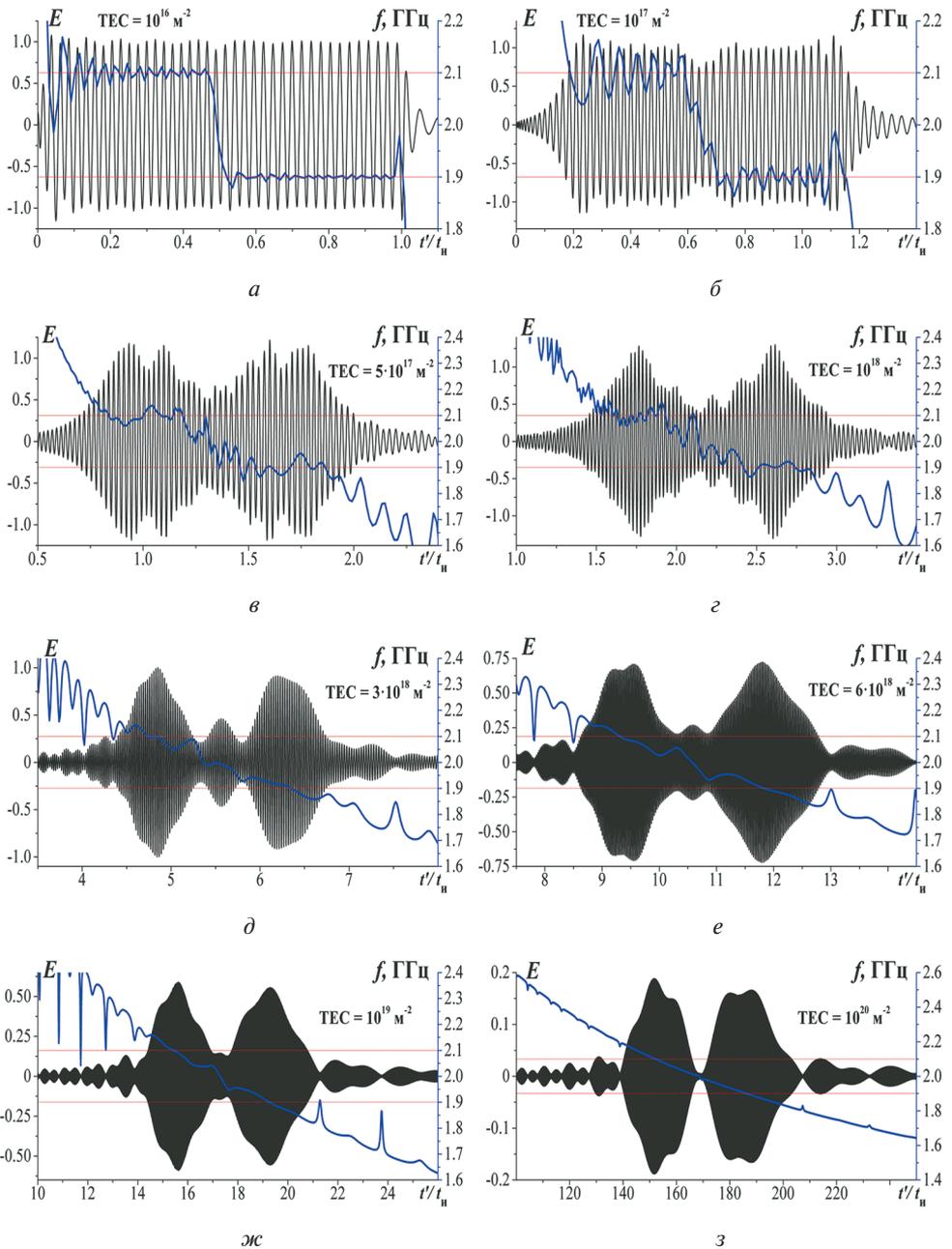


Рис. 6. Напряжённость поля и мгновенная частота радиоимпульса с частотной манипуляцией, изображённого на рис. 1г, при распространении в межпланетной плазме.

Интегральные характеристики поля $E(\text{TEC}; t')$

TEC, м ⁻²	K = 2				K = 4			
	$f'_1 = 1,9 \text{ ГГц}$ и $f'_2 = 2,1 \text{ ГГц}$		$f'_1 = 2,1 \text{ ГГц}$ и $f'_2 = 1,9 \text{ ГГц}$		$f'_1 = f'_3 = 1,9 \text{ ГГц}$ и $f'_2 = f'_4 = 2,1 \text{ ГГц}$		$f'_1 = f'_3 = 2,1 \text{ ГГц}$ и $f'_2 = f'_4 = 1,9 \text{ ГГц}$	
	$\bar{t}_{\text{цт}}$	$\Delta\bar{t}_{\text{и}}$	$\bar{t}_{\text{цт}}$	$\Delta\bar{t}_{\text{и}}$	$\bar{t}_{\text{цт}}$	$\Delta\bar{t}_{\text{и}}$	$\bar{t}_{\text{цт}}$	$\Delta\bar{t}_{\text{и}}$
0	0,500	0,289	0,500	0,289	0,500	0,289	0,500	0,289
10 ¹⁶	0,518	0,291	0,518	0,294	0,518	0,291	0,518	0,293
10 ¹⁷	0,674	0,292	0,674	0,313	0,674	0,292	0,674	0,307
10 ¹⁸	2,212	0,298	2,212	0,508	2,212	0,365	2,212	0,467
10 ¹⁹	17,540	2,136	17,54	2,496	17,540	2,243	17,540	2,420
10 ²⁰	170,700	21,110	170,700	21,490	170,600	21,110	170,500	20,720

На рис. 7 сопоставлены две характеристики (амплитудные спектры и автокорреляционные функции

$$\Psi_A(\text{TEC}; \mu) = \frac{1}{E_{\text{и}}(0)} \int_{\mu}^{\infty} E(\text{TEC}; t') E(\text{TEC}; t' - \mu) dt'$$

импульсов, изображённых на рис. 1а и з, в начале и конце трассы. Можно видеть, что они полностью совпадают. Таким образом, анализ показывает, что принимаемый сигнал может содержать информацию о характеристиках импульса, поступающего в среду.

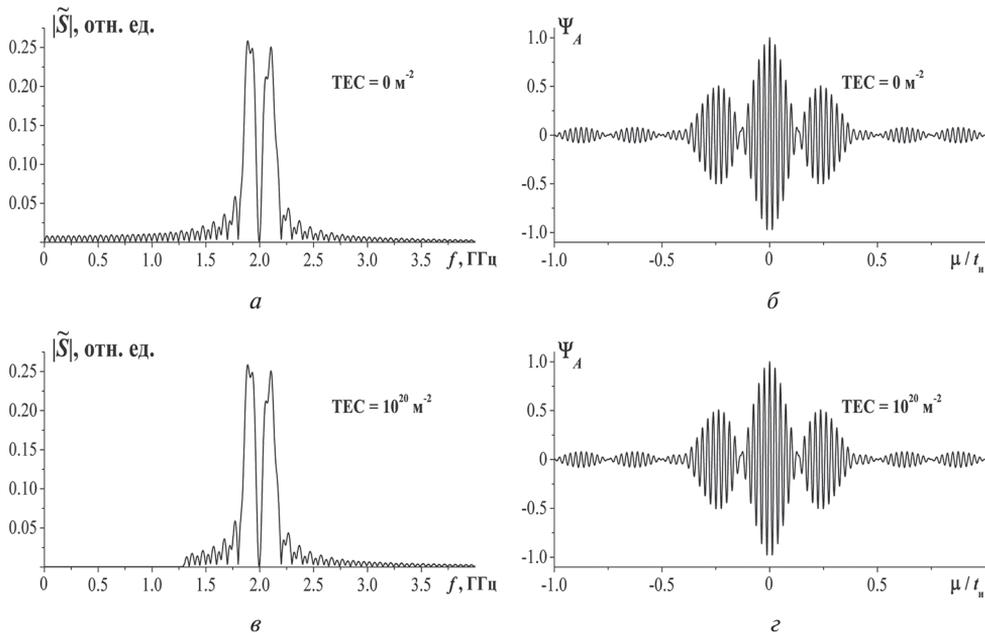


Рис. 7. Сопоставление амплитудных спектров (а, в) и автокорреляционных функций (б, г) излучённых импульсов с частотной манипуляцией (рис. 1а и 2а) и импульсов, деформированных в плазменной среде (рис. 3з и 5з).

Содержание рис. 8–11 полностью аналогично содержанию рис. 3–5 соответственно. Новым теперь становится увеличение числа частот излучаемых импульсов до $K = 4$ (см. рис. 2) при сохранении их длительности $t_{\text{и}} = 20,05$ нс.

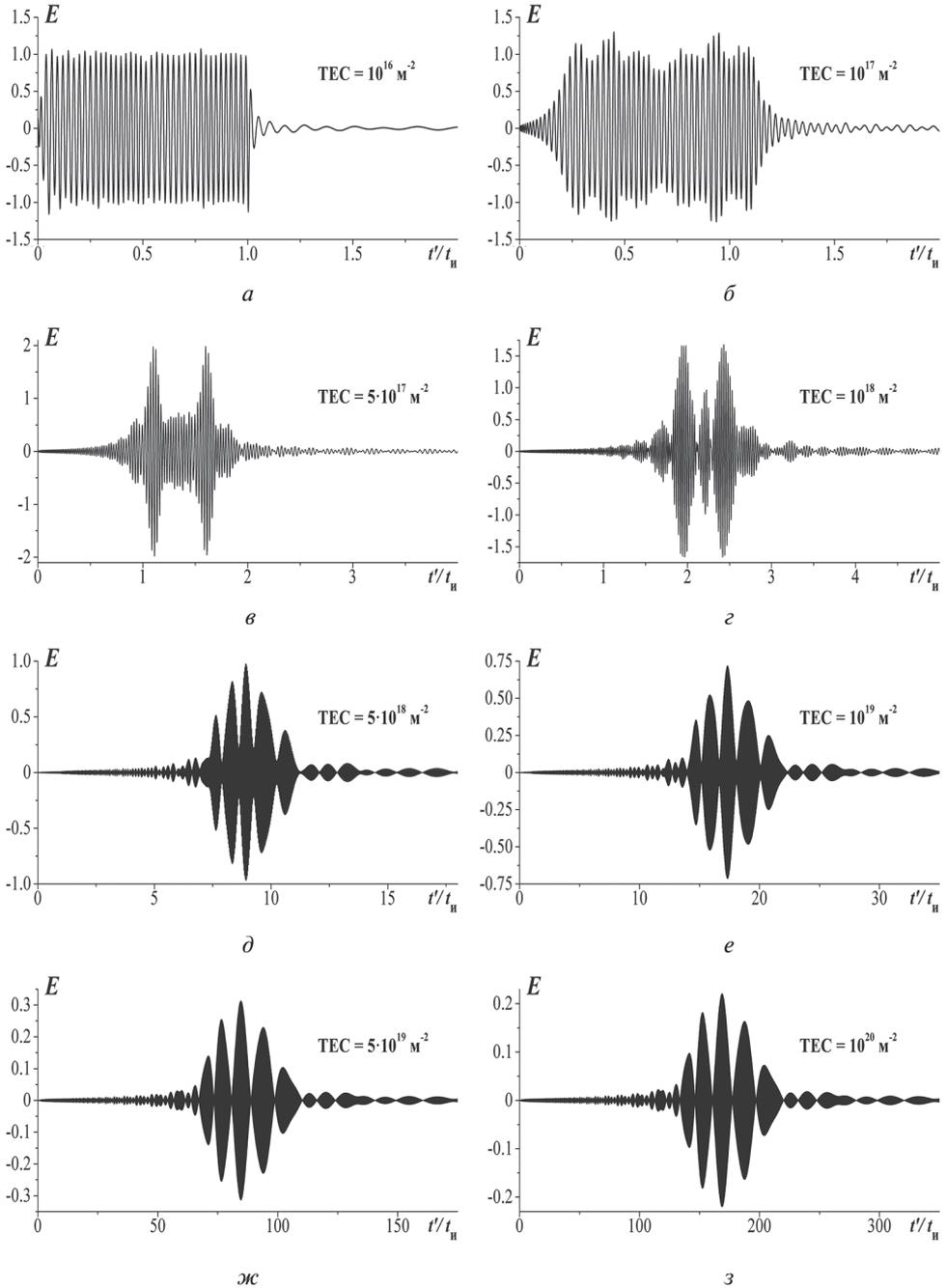


Рис. 8. Эволюция напряжённости поля импульса с увеличением TEC трассы при $K = 4$, $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 10$, $f'_1 = f'_3 = 1,9$ ГГц, $f'_2 = f'_4 = 2,1$ ГГц, $t_{\text{и}} = 20,05$ нс

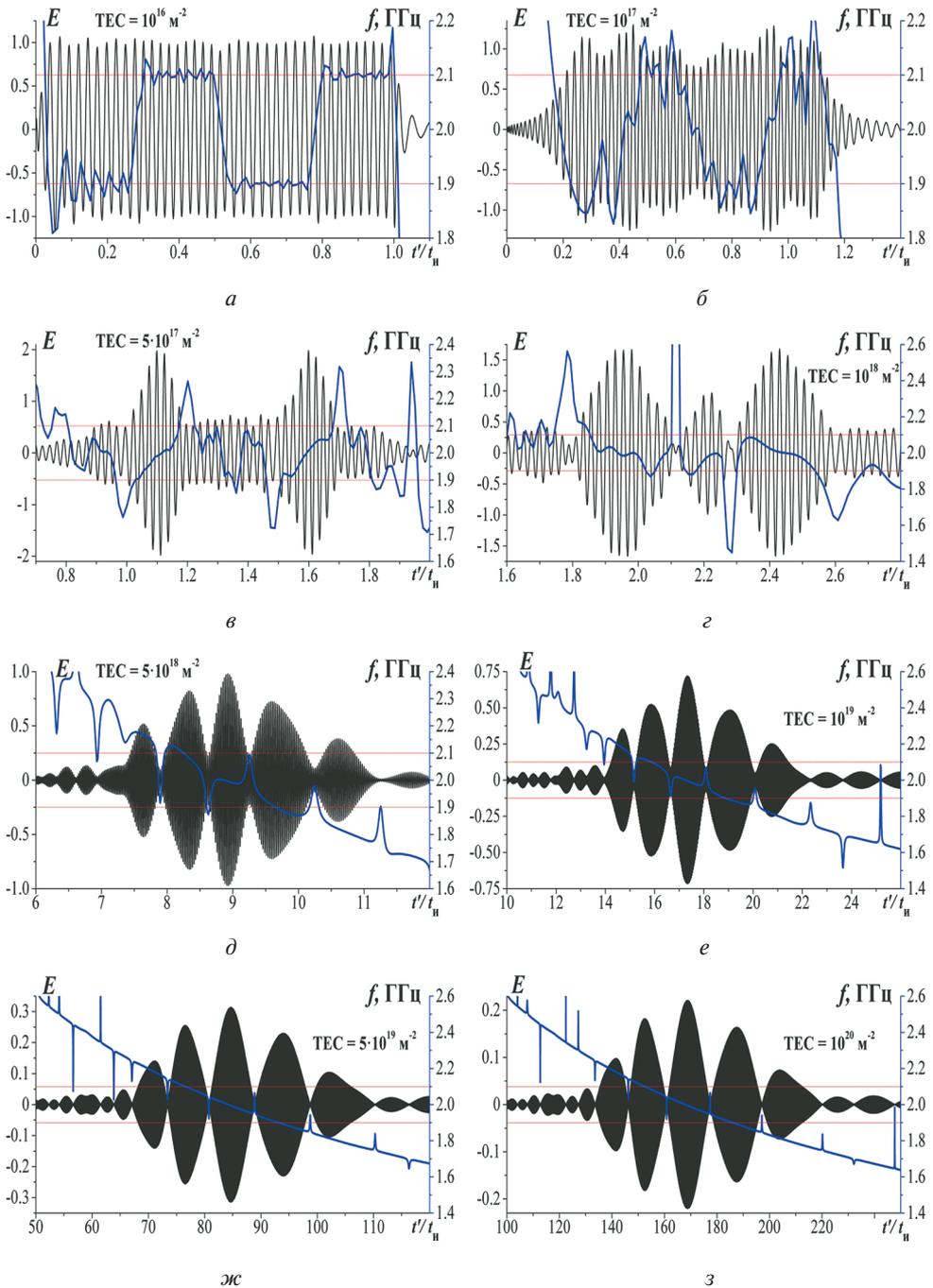


Рис. 9. Напряжённость поля и мгновенная частота радиоимпульса с частотной манипуляцией, изображённого на рис. 2а, при распространении в межпланетной плазме

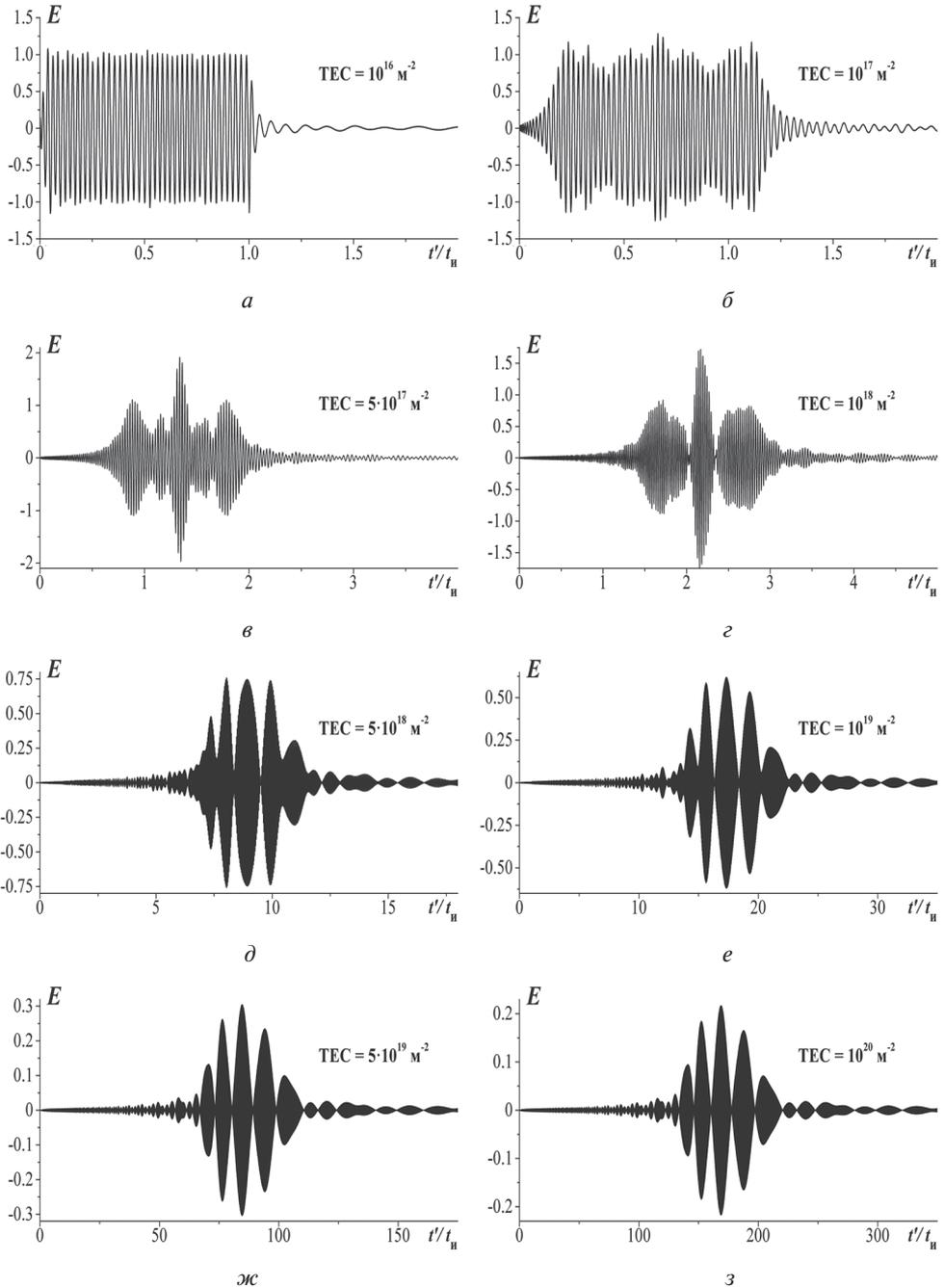


Рис. 10. Эволюция напряженности поля импульса с увеличением TEC трассы при $K = 4$, $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 10$, $f'_1 = f'_3 = 2,1 \text{ ГГц}$, $f'_2 = f'_4 = 1,9 \text{ ГГц}$, $t_n = 20,05 \text{ нс}$

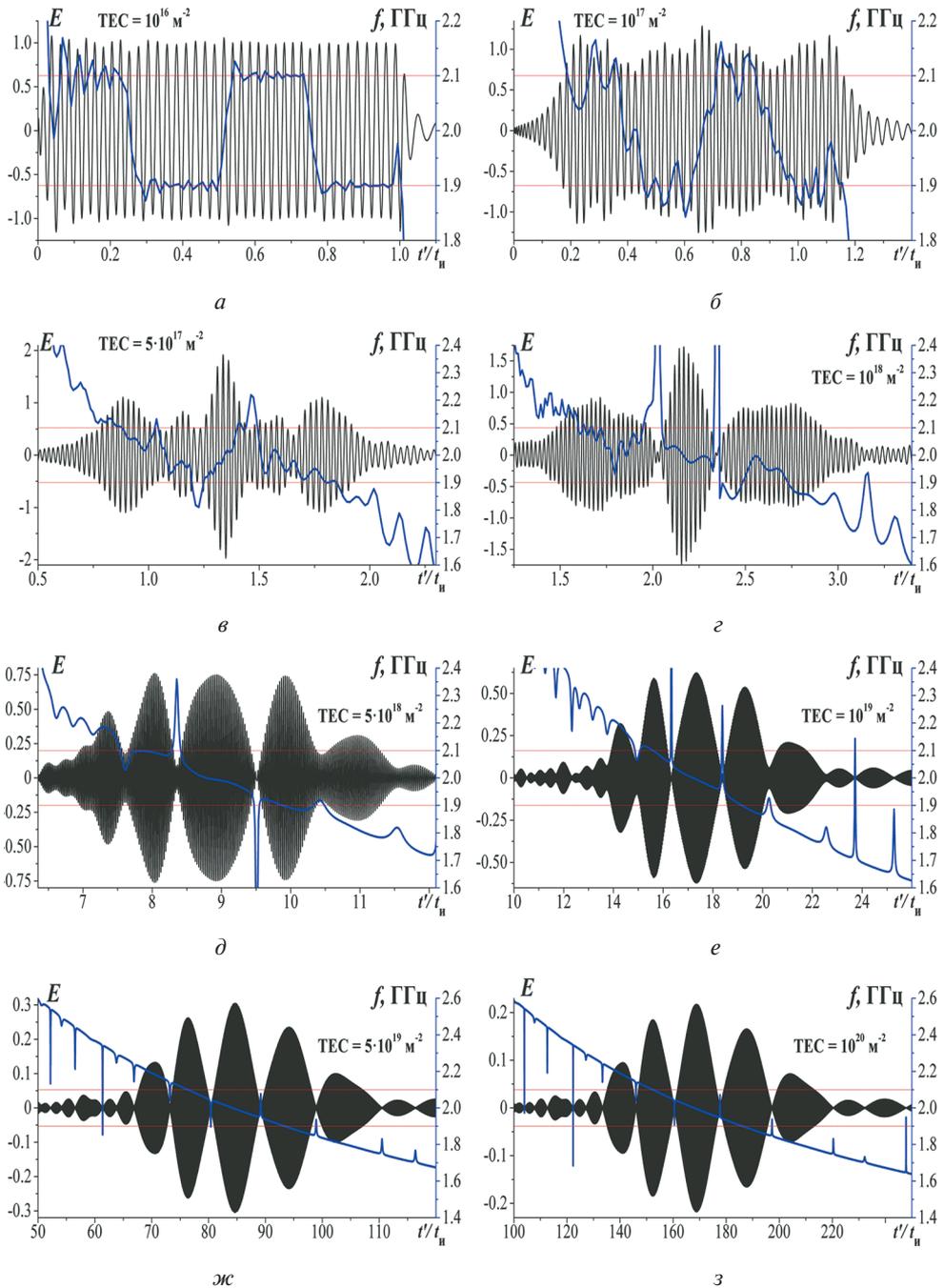


Рис. 11. Напряжённость поля и мгновенная частота радиопульса с частотной манипуляцией, изображённого на рис. 2г, при распространении в межпланетной плазме

На рис. 2б и д спектры излучаемых импульсов содержат совокупности максимумов, центрированных в окрестности частоты 2,0 ГГц. На рис. 8з и 10з уже принимаемые поля содержат соответствующие совокупности максимумов. Обращаясь далее к рис. 9з и 11з, видим, что мгновенная частота принимаемых импульсов монотонно убывает, имея вблизи центра наиболее высокого максимума поля частоту, близкую к 2,0 ГГц.

Визуально кривые поля и мгновенной частоты на рис. 9з и 11з при $K = 4$, а также рис. 4з и 6з при $K = 2$ повторяют друг друга соответственно, что и следовало ожидать, исходя из совпадения их амплитудных спектров (см. рис. 2б, д и рис. 1б, д). Таким образом, варьируя изменением во времени основного параметра излучаемого импульса (несущей частоты его частей), на приёмном конце трассы можно тем не менее обеспечивать неизменность его других характеристик.

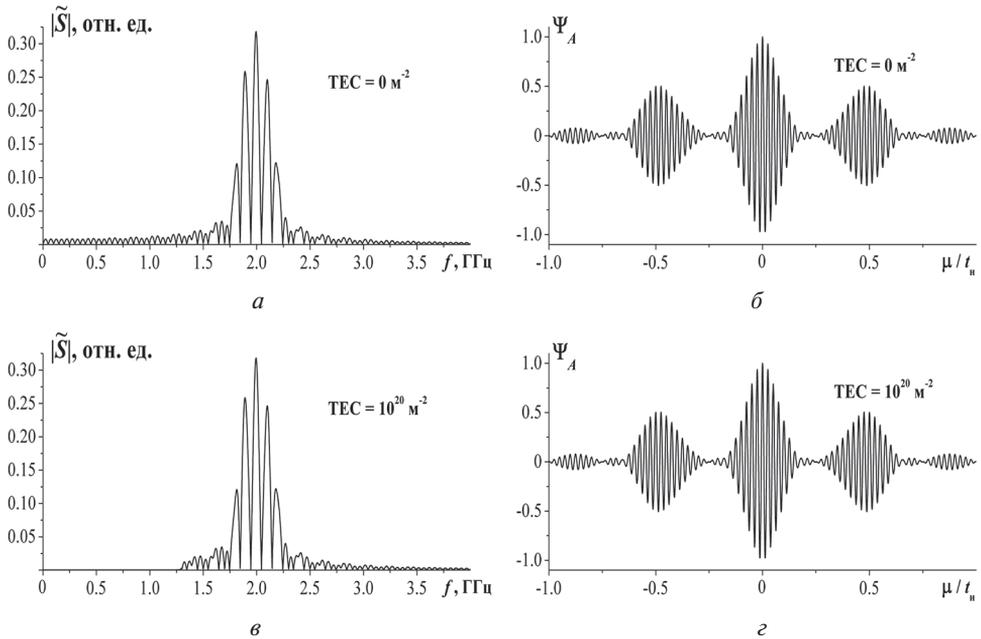


Рис. 12. Сопоставление амплитудных спектров (а, в) и автокорреляционных функций (б, г) излучённых импульсов с частотной манипуляцией (рис. 2а и з) и импульсов, деформированных в плазменной среде (рис. 8з и 10з)

Наконец, из кривых рис. 12, который полностью аналогичен рис. 7, следует, что указанное увеличение частей излучаемого импульса не влияет на изменение его автокорреляционной функции в процессе распространения. Что касается сохранения вида спектра импульса, то, по-видимому, этот эффект полностью обусловлен отсутствием поглощения в среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен начальный анализ характера и возможных особенностей процесса распространения радиоимпульса гигагерцевого диапазона с частотной манипуляцией на протяжённых межпланетных трассах. Полученные результаты

позволяют заключить, что, несмотря на значительную деформацию излучаемых импульсов в холодной бесстолкновительной плазме, их амплитудный спектр и автокорреляционная функция не изменяются, мгновенная частота деформированного импульса, начиная с некоторых значений ТЕС, монотонно убывает со временем, а огибающая деформированного импульса принимает вид амплитудного спектра, обращённого по частоте за счёт полного разделения формирующих импульс групп гармоник по временной оси в порядке их убывания по частоте.

Работа выполнена в рамках госзадания ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Стрелков Г. М. Сложный радиосигнал в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1094–1103.
- Худышев Ю. С. Сверхкороткий радиоимпульс со скачками начальной фазы на межпланетной трассе // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. Москва, 14–16 апр. 2021. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 113–123.

ULTRASHORT RADIO WAVE PULSE WITH FREQUENCY-SHIFT KEYING ON THE INTERPLANETARY PATH

Yu. S. Khudyshev

Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS (FIRE RAS), Fryazino, Russia

The nature and possible features of the propagation process of an ultrashort sinusoidal radio wave pulse with frequency-shift keying in a collisionless plasma medium on paths with integral electron content (TEC) corresponding to interplanetary distances are considered. It is shown that for sufficiently large TEC values, the changes in the field strength in time at the entrance to the medium and at the receiving end of the path can be fundamentally different, and the time course of the instantaneous frequency of field oscillations is characterized by a decrease close to monotonic. In this case, the shape of the autocorrelation functions of deformed pulses is retained with increasing TEC. It is also shown that the features of the time variations of the received field can be a priori expected on the basis of a preliminary analysis of the amplitude spectrum.

Keywords: sinusoidal radio wave pulse, frequency-shift keying, instantaneous frequency, dispersion distortions, interplanetary plasma

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

АТМОСФЕРНЫЕ ПОТЕРИ N₂ И O₂ ВО ВРЕМЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИНВЕРСИЙ**О. О. Царёва¹, Н. Н. Левашов^{1,2}, В. Ю. Попов^{1,2,3}**¹ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), физический факультет, Москва, Россия³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия

Магнитосфера защищает атмосферу планеты от эрозии солнечным ветром. Ранее было показано, что во время геомагнитной инверсии, когда дипольная составляющая поля ослабевает, магнитное экранирование по-прежнему эффективно. Это справедливо для спокойных периодов солнечной активности. Однако поскольку продолжительность геомагнитной инверсии может охватывать несколько тысяч лет, на протяжении которых происходит множество экстремальных событий, мы развили наше исследование атмосферных потерь с учётом влияния солнечных параметров, таких как давление солнечного ветра и EUV-излучение (источник образования ионов). Палеоданные указывают на увеличение отношений изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{15}\text{N}$ с увеличением скорости инверсии в течение фанерозоя. Согласно нашим оценкам, такая эффективность фракционирования изотопов может быть связана с диссипацией атмосферы солнечным ветром.

Ключевые слова: геомагнитная инверсия; диссипация атмосферы; массовые вымирания

На протяжении фанерозоя имело место пять крупных массовых вымираний. Последнее — мел-палеогеновое вымирание, уничтожившее динозавров, произошло примерно 65 млн лет назад, но было не самым значительным. Наикрупнейшее из них — пермское или «Великое вымирание»: 250 млн лет назад оно уничтожило 90 % биоразнообразия. Четыре Великих вымирания фанерозоя произошли вслед за сменой полярности геомагнитных суперхронов, при этом задержка между концом каждого суперхрона и последующим массовым вымиранием составляет примерно 10–20 млн лет. На рис. 1а показаны скорости геомагнитной инверсии в фанерозойском зоне, временные интервалы массовых вымираний и суперхронов отмечены зелёным и фиолетовым цветами соответственно. Во время 2-го, 3-го и 4-го вымираний скорость инверсии возрастала, а уровень O₂ снижался (рис. 1б). И наоборот, во время суперхронов, когда скорость инверсии оставалась очень низкой, уровень O₂ также повышался. Таким образом, авторы работы (Wei et al., 2014) выдвинули гипотезу, что усиление геомагнитных инверсий могло увеличить диссипацию атмосферы, что благодаря кумулятивному эффекту в течение нескольких миллионов лет привело к значительному снижению уровня кислорода.

Другой метод проверки этой гипотезы — увеличение отношения изотопов кислорода, поскольку диссипация ионов способствует потере более лёгких изотопов. На рис. 1с представлены вариации отношений изотопов азота $\delta^{15}\text{N}$ и кислорода $\delta^{18}\text{O}$ (красная и синяя кривые) в течение фанерозойского зона. Приведённые палеоданные свидетельствуют о значительных потерях изотопов азота во время инверсий. Ускорение ионов азота N⁺ не рассматривалось в большинстве атмосферных исследований, поскольку в большинстве миссий

Царёва Ольга Олеговна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, olga8.92@mail.ru

Левашов Николай Николаевич — аспирант

Попов Виктор Юрьевич — профессор, доктор физико-математических наук

не было возможности надёжно отделить ионы азота N^+ от кислорода O^+ вследствие их близких масс. Статистические данные об относительном вкладе азота N^+ в ионосферные потери также отсутствуют. Однако наблюдения IMS во время геомагнитной бури 4 августа 1972 г. (планетарный индекс $Kp = 9$) показали, что ионы N^+ стали доминирующей популяцией на высоте 1400 км и широтах выше 55° (Hoffman et al., 1974), стало быть, с ростом солнечной активности верхние слои атмосферы обогащаются ионами N^+ .

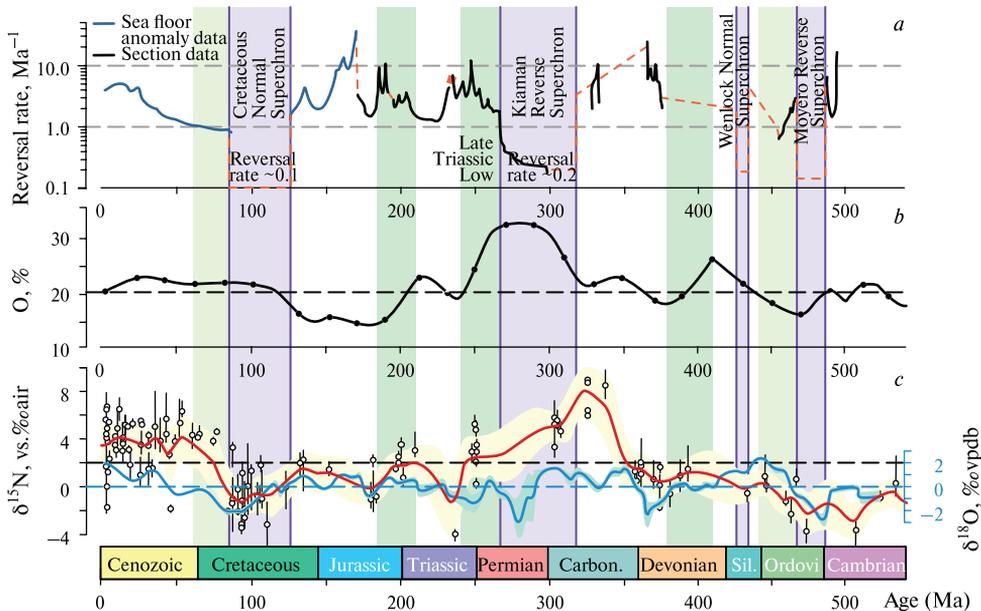


Рис. 1. Скорости геомагнитных инверсий в течение фанерозойского эона (Hounslow et al., 2018) (a); атмосферный O_2 на основе разницы $\delta^{13}C$ между морским и наземным органическим веществом (Berger, 2009) (b); вековые вариации отношений изотопов азота $\delta^{15}N$ в морских отложениях и кислорода $\delta^{18}O$ в окаменелостях (красная и синяя кривые) с исключением изменений, связанных с медленной радиогенной эволюцией мантии (Algeo et al., 2014; Veizer et al., 1999) (c)

Таким образом, для оценки атмосферных потерь азота N и кислорода O во время палеомагнитных инверсий необходимо учитывать изменения давления солнечного ветра и ультрафиолетового EUV-излучения (*англ.* Extreme ultraviolet lithography), как основного источника формирования ионосферы. Рассмотрим подробнее солнечные параметры, влияющие на атмосферные потери.

Поток EUV приводит к фотоионизации планетарных нейтралов и нагреву верхней атмосферы с последующим её расширением. Для определения зависимости радиуса, плотности и температуры экзобазы от потока EUV, мы использовали результаты гидродинамической модели из публикации (Tian et al., 2008). Согласно ей, в экстремальных условиях EUV-излучения атомарный азот N становится доминирующим нейтральным веществом в верхней термосфере (конкурируя с атомарным кислородом O), но ионы N^+ остаются второстепенными по сравнению с ионами O^+ .

Импульс солнечного ветра — ключевой источник поступления энергии в плазму планеты, но эффективность этого процесса сильно зависит от величины и конфигурации собственного магнитного поля планеты. Современное

дипольное поле Земли (напряжённостью 29,4 мкТл), взаимодействуя с солнечным ветром, образует магнитосферу, простирающуюся в среднем до $10R_E$ (радиусов Земли) в подсолнечной точке и эффективно препятствующую прямому взаимодействию солнечного ветра на планетарную ионосферу.

Во время инверсии будем полагать, что магнитное поле Земли принимает квадрупольную конфигурацию с напряжённостью в 2,5 мкТл. Среднее расстояние до магнитопаузы в подсолнечной точке в тех же солнечных условиях составляет $3,36R_E$ (Tsareva et al., 2019). Удалённость границы магнитосферы определяется из баланса между динамическим давлением солнечного ветра и давлением планетарного магнитного поля (или тепловым давлением ионосферы для индуцированной магнитосферы).

Авторы работы (Wei et al., 2014) оценили эволюцию солнечных параметров в течение фанерозойского эона. Поскольку скорость потери массы Солнца \dot{M} зависит от возраста звезды t и её активности F_X как $\dot{M} \sim F_X^{1.15 \pm 0.20} \sim t^{-2.33 \pm 0.55}$, то 600 млн лет назад солнечный ветер с давлением $P_{sw} \sim \dot{M} v_{sw}$ был в 1,5 раза плотнее современного ветра с P_{sw0} (Wood et al., 2002), а EUV-поток — в 1,5 раза выше. Однако сравнение с солнцеподобной звездой 18 Scorpii (HD 146233) возрастом 300 млн лет позволяет оценить верхний предел P_{sw} в 3,7 раза больше, чем P_{sw0} .

Солнечное EUV-излучение изменяется в три раза в соответствии с солнечным циклом, а усреднённое давление солнечного ветра P_{sw0} варьируется в диапазоне 1,4–8 нПа без учёта влияния космической погоды. Во время геомагнитных бурь динамическое давление солнечного ветра может достигать 50–100 нПа.

Авторы публикации (Gunell et al., 2018) представили основные механизмы ускорения атмосферных частиц и привели скорости потерь кислорода O и водорода H для каждого механизма в зависимости от напряжённости дипольного магнитного поля. На основе их оценок мы выделили наиболее существенные механизмы диссипации атмосферы.

В присутствии сильного магнитного поля наибольший вклад в атмосферные потери оказывают полярный и авроральный ветры, т.е. механизмы ускорения ионов в полярных шапках и каспах. Скорости потерь α -ионов полярного и аврорального ветров пропорциональны площади областей открытых силовых линий S_{ps} :

$$Q_{pw,\alpha} = n_{exo,\alpha} v_{exo,\alpha} A \sim n_{exo,\alpha} \sqrt{\frac{2GM_E \mu}{r_{exo} m_\alpha}} S_{ps}, \quad (1)$$

где r_{exo} и $n_{exo,\alpha}$ — радиус и плотность экзобазы.

Авроральный ветер также зависит от площади поперечного сечения взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы πh_{mag-sp}^2 , а также от давления солнечного ветра.

$$Q_{aw,\alpha} \sim n_{exo,\alpha} v_{exo,\alpha} \pi h_{mag-sp}^2 S_{ps} P_{sw}^{0.61}. \quad (2)$$

Если собственное магнитное поле слабее или равно индуцированному, то солнечный ветер прямо воздействует на ионосферу планеты, подобно Марсу и Венере, что способствует распылению ионов и нейтралов при бомбардировке экзосферы быстрыми ионами солнечного ветра, а также захвату ионов конвекцией солнечного ветра. Потери, вызванные солнечным ветром, оценены на основе передачи импульса солнечного ветра плазме планеты. Формула выведена в исследовании (Lundin, Dubinin, 1992) для Марса, но была использована в работе (Wei et al., 2014) для Земли. Ускоренный поток магнитосферы (E) связан с падающим потоком солнечного ветра (sw, *англ.* solar wind) и локальным (замедленным) потоком солнечного ветра (swE) как:

$$Q_{sw-driv} = \delta \frac{v_{sw} m_{sw}}{v_E m_E} \left(n_{sw} v_{sw} - \frac{v_{swE}}{v_{sw}} n_{swE} v_{swE} \right) A = n_E v_E A, \quad (3)$$

где v , m , n — скорость, масса, плотность; $\delta = \delta_{sw} / \delta_E$ определяет относительную толщину обмена импульсом:

$$\delta = \left(\frac{v_E}{v_{sw}} \right)^2 \frac{n_E m_E}{n_{sw} m_{sw}} \left(1 - \frac{n_{swE} v_{swE}^2}{n_{sw} v_{sw}^2} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Сечение области передачи импульса $A = \pi (R_{MLB}^2 - R_{MP}^2)$, в которой происходит передача энергии и импульса солнечного ветра, лежит между границей массовой загрузки (MLB) $R_{MLB} = R_{MP} + \delta (R_{MP} - R_E - 100 \text{ км})$ и магнитопаузой (MP, *англ.* magnetopause) на терминаторе.

Полярный и авроральный ветры эффективно уносят все изотопы, что приводит к малому фракционированию изотопов. А вот механизмы диссипации, вызванные прямым воздействием солнечного ветра, предпочтительно удаляют более лёгкие изотопы, при этом расширенные атмосферы фракционируются легче. Таким образом, увеличение потерь изотопов во время инверсий свидетельствует о смене механизма доминирующего диссипации.

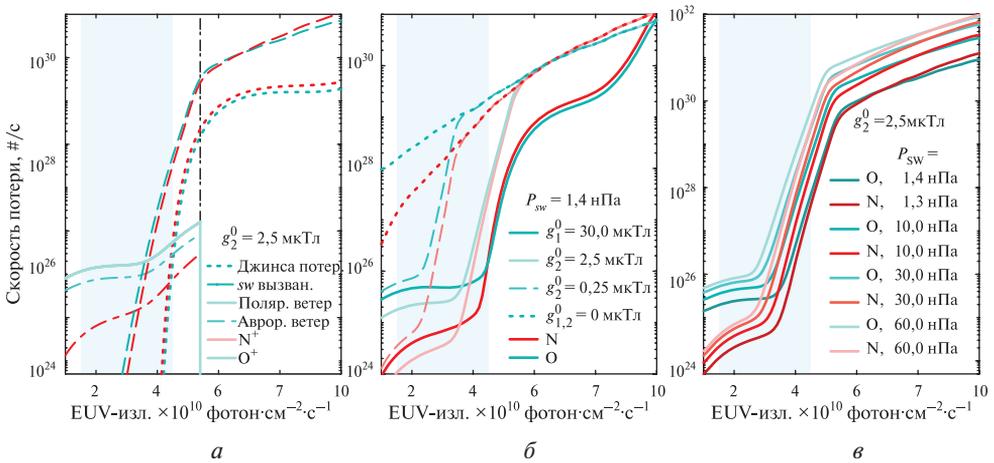


Рис. 2. Вклад каждого механизма диссипации в скорости потерь O и N в зависимости от EUV-излучения для квадрупольного магнитного поля 2,5 мкТл и при давлении солнечного ветра 1,4 нПа (а); суммарные потери O и N для различной напряжённости и конфигурации магнитного поля (б); суммарные потери O и N для квадрупольного магнитного поля 2,5 мкТл и при различном давлении солнечного ветра P_{sw} , меняющемся в диапазоне 3–30 нПа в течение фанерозоя (в). Серым цветом выделен диапазон EUV-излучения (1,5–4,5) в фанерозойском эоне

На рис. 2а видно, что с увеличением EUV-излучения разрыв между скоростями потерь азота и кислорода сокращается, а также меняется доминирующей механизм диссипации. При современном EUV-излучении внутреннее магнитное поле отклоняет солнечный ветер и способствует полярному и авроральному ветрам. С ростом EUV-излучения ионосфера расширяется и тем самым подвергается прямому воздействию солнечного ветра, увеличивающему захват и распыление ионов. Таким образом, скорости потерь кислорода увеличиваются на три порядка, а азота — на четыре порядка. При дальнейшем нагревании ионо-

сферы доминирует тепловая диссипация Джинса. Увеличение давления солнечного ветра также способствует атмосферным потерям. Как видно на рис. 2в, чем больше давление солнечного ветра, тем меньше EUV-излучение, при котором происходит смена доминирующего механизма диссипации.

Работа О. О. Царевой и Н. Н. Левашова поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № МК-5053.2022.6.

ЛИТЕРАТУРА

- Algeo T. J., Meyers P. A., Robinson R. S., Rowe H., Jiang G. Q.* Icehouse-greenhouse variations in marine denitrification // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. Iss. 4. P. 1273–1295. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1273-2014>.
- Berner R. A.* Phanerozoic atmospheric oxygen: new results using the GEOCARBSULF model // *American J. Science*. 2009. V. 309. Iss. 7. P. 603–606. <https://doi.org/10.2475/07.2009.03>.
- Gunell H., Maggiolo R., Nilsson H., Wieser G. S., Slapak R., Lindkvist J., Hamrin M., De Keyser J.* Why an intrinsic magnetic field does not protect a planet against atmospheric escape // *Astronomy and Astrophysics*. 2018. V. 614. Art. No. L3. 8 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832934>.
- Hoffman J. H., Dodson W. H., Lippincott C. R., Hammack H. D.* Initial ion composition results from the Isis 2 satellite // *J. Geophysical Research*. 1974. V. 79. P. 4246–4251. <https://doi.org/10.1029/JA079i028p04246>.
- Hounslow M. W., Domeier M., Biggin A. J.* Subduction flux modulates the geomagnetic polarity reversal rate // *Tectonophysics*. 2018. V. 742–743. P. 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.018>.
- Lundin R., Dubinin E. M.* Phobos-2 results on the ionospheric plasma escape from Mars // *Advances in Space Research*. 1992. V. 12. Iss. 9. P. 255–263. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(92\)90338-X](https://doi.org/10.1016/0273-1177(92)90338-X).
- Tian F., Solomon S. C., Qian L., Lei J., Roble R. G.* Hydrodynamic planetary thermosphere model: 2. Coupling of an electron transport/energy deposition model // *J. Geophysical Research: Planets*. 2008. V. 113. Iss. E7. Art. No. E07005. 13 p. <https://doi.org/10.1029/2007JE003043>.
- Tsareva O. O., Dubinin E. M., Malova H. V., Zelenyi L. M.* Atmospheric escape from the earth during geomagnetic reversal // *Annals of Geophysics*. 2019. V. 63. Iss. 2. Art. No. PA223. 12 p. <https://doi.org/10.4401/ag-8354>.
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Bruckshen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G. A. F., Diener A., Stefan Ebner, Godderis Y., Jasper T., Korte Ch., Pawellek F., Podlaha O. G., Strauss H.* $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater // *Chemical Geology*. 1999. V. 161. Iss. 1–3. P. 59–88.
- Wei Y., Pu Z., Zong Q., Wan W., Ren Z., Fraenz M., Dubinin E., Tian F., Shi Q., Fu S., Hong M.* Oxygen escape from the earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 394. P. 94–98. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.03.018.
- Wood B. E., Muller H.-R., Zank G. P., Linsky J. L.* Measured mass-loss rates of solar-like stars as a function of age and activity // *Astrophysical J.* 2002. V. 574. Iss. 1. P. 412–425.

ATMOSPHERIC LOSS OF N₂ AND O₂ DURING PALEOMAGNETIC REVERSALS

O. O. Tsareva¹, N. N. Levashov^{1,2}, V. Yu. Popov^{1,2,3}

¹ Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University (MSU), Physical Faculty, Moscow, Russia

³ Higher School of Economics National Research University (HSE University)
Moscow, Russia

The magnetosphere protects the planet's atmosphere from erosion by the solar wind. We have previously shown that during a geomagnetic reversal, when the dipole field component weakens, magnetic shielding is still effective. This conclusion is valid for quiet periods of solar activity. However, since the duration of a geomagnetic reversal can cover several thousand years, during which many extreme events occur, we have to take into account changes in solar parameters such as solar wind pressure and EUV radiation (the source of ion production). Paleodata indicate an increase in the ratios of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopes with an increase in the reversal rates during the Phanerozoic eon. According to our estimates, such an efficiency of isotope fractionation can be associated with the atmospheric loss due to the solar wind-driven escape.

Keywords: Atmospheric loss, geomagnetic reversal, mass extinctions

Tsareva Olga Olegovna — researcher, candidate of physical and mathematical sciences, olga8.92@mail.ru

Levashov Nikolay Nikolaevich — postgraduate

Popov Victor Yurievich — professor, doctor of physical and mathematical sciences

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЛАЧНОСТИ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

М. Ю. Червяков, Е. С. Диянова

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (СГУ)
Саратов, Россия

Рассматривается сравнительный анализ облачности в Саратовской обл. по данным спутникового проекта NASA Earth Observation Cloud Fraction и наземных наблюдений, взятых из архива данных научно-исследовательского института ВНИИГМИ-МЦД в Обнинске. Проведён пространственно-временной анализ карт многолетнего среднего значения облачности.

Ключевые слова: облачность, спутниковые наблюдения, наземные наблюдения, пространственно-временная изменчивость облачности

В настоящее время ведутся наземные метеорологические и спутниковые наблюдения за облачностью. Первые подразумевают визуальное определение форм и балловой оценки облачности. Такой метод применяется на сети метеорологических станций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета) и имеет ряд недостатков, которые прежде всего связаны с погрешностью, вызванной субъективным взглядом техника-наблюдателя. В современных условиях представляет интерес проведение качественной и количественной оценки облачности по имеющейся в свободном доступе различной спутниковой информации об облачности (Скляров и др., 2013; Суркова, Червяков, 2020; Суркова и др., 2019).

Для анализа временной изменчивости облачности в Саратовской обл. были использованы месячные данные параметра облачного покрытия (балльность — Cloud Fraction, CF) из базы данных наблюдений с помощью спектрорадиометров MODIS (*англ.* Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), установленных на гелиосинхронных, полярно-орбитальных спутниках Terra и Aqua.

Инструмент MODIS ведёт наблюдения в 36 спектральных каналах (от 0,41 до 14 мкм) с радиометрическим разрешением в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах и позволяет производить регулярную съёмку одной территории с пространственным разрешением до 250, 500 и 1000 км. Ширина полосы обзора составляет 2330 км. MODIS собирает информацию в пикселях. Одна из немаловажных задач прибора состоит в получении информации о пространственно-временном распределении облачности, данных о том, как формируются и развиваются облака, и как они влияют на погоду и климат.

Глобальные месячные сцены NEO (продукт NASA (Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства — *англ.* NASA, National Aeronautics and Space Administration) Earth Observation) Cloud Fraction представлены в виде матриц размера 1440×720. Значение пикселя отражает пространственно-временную долю покрытия общей облачностью на момент пролёта спутника в выбранном месячном окне.

Для сопоставления со спутниковой информацией и проведения корреляционного анализа наземные данные были взяты из архива данных гидрометеорологических наблюдений, сосредоточенных во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мировом центре

Червяков Максим Юрьевич — заведующий кафедрой, кандидат географических наук, доцент, chervyakovmu@mail.ru

Диянова Екатерина Сергеевна — студентка

данных (ВНИИГМИ-МЦД) в Обнинске. ВНИИГМИ-МЦД — это крупнейший в мире научный центр, где собран архив гидрометеорологических данных за последние полтора века. Массив данных регулярно пополняется.

Для оптимального анализа общего количества облачности по проекту NASA Earth Observation Cloud Fraction и информации ВНИИГМИ-МЦД спутниковые данные были переведены в баллы облачности.

В качестве опорных точек были выбраны Саратов, Ершов, Балашов, на которых есть метеорологические станции.

На рис. 1–3 представлено сопоставление данных общего количества облачности и спутниковых измерений. Видна хорошая согласованность рассматриваемых величин.

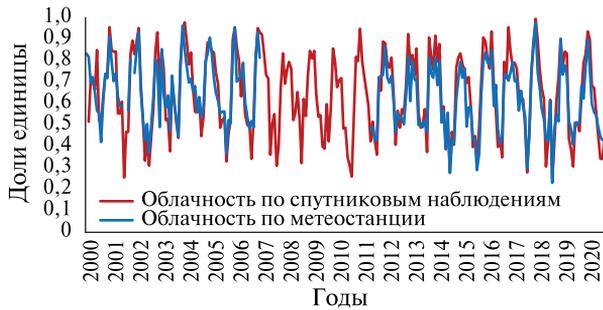


Рис. 1. Временной ход общего количества облачности в Саратове по наземным данным и спутниковым измерениям NASA (Terra) за период 2000–2020 гг.

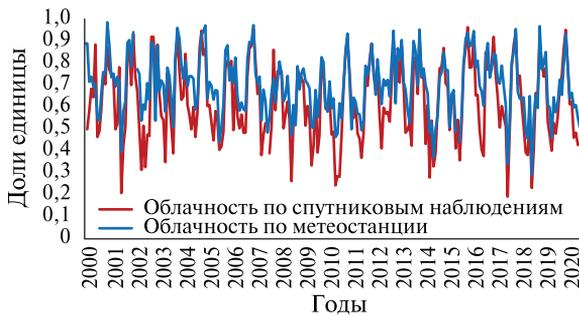


Рис. 2. Временной ход общего количества облачности в Ершове по наземным данным и спутниковым измерениям NASA (Terra) за период 2000–2020 гг.

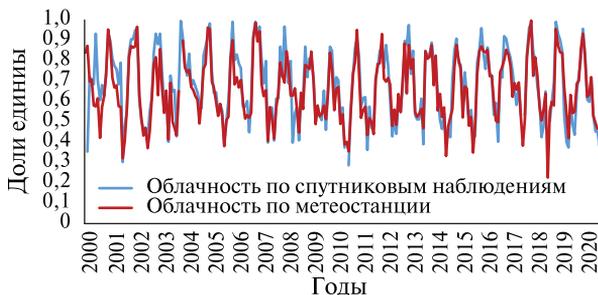
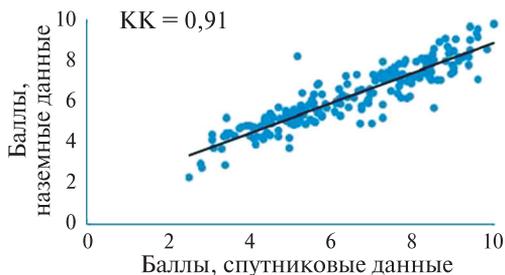


Рис. 3. Временной ход общего количества облачности в Балашове по наземным данным и спутниковым измерениям NASA (Terra) за период 2000–2020 гг.

Рис. 4. Корреляционная диаграмма временной изменчивости общей облачности и CF в Саратове



На рис. 4 в качестве примера изображена корреляционная диаграмма для Саратова. Получена хорошая согласованность рядов данных: коэффициент корреляции (КК) составил 0,91. Аналогичные диаграммы построены для Ершова (КК = 0,87) и Балашова (КК = 0,84). Данная методика может быть применена для тех районов, где метеорологические наблюдения не ведутся.

Таким образом, проведённые сравнения позволили сделать вывод о пригодности спутниковых данных проекта NASA Earth Observation Cloud Fraction для оценки изменчивости общего количества облачности. Спутниковые методы наблюдения выступают одним из важных источников получения информации по облачности. Спутники работают штатно, данные всё время пополняются, поэтому с их помощью можно оценивать климатические тренды облачности для различных районов.

Также в работе проведён анализ карт распределения многолетнего среднего значения облачности, представленный на рис. 5.

Для анализа пространственных данных используются модели поверхностей, которые могут быть созданы разными методами.

В данной работе карты собирались из непрерывного поля значений, которое представляет собой набор ячеек. Поскольку поле значений представлено ячейками, нужно было подобрать оптимальную форму ячеек и длину её сторон.

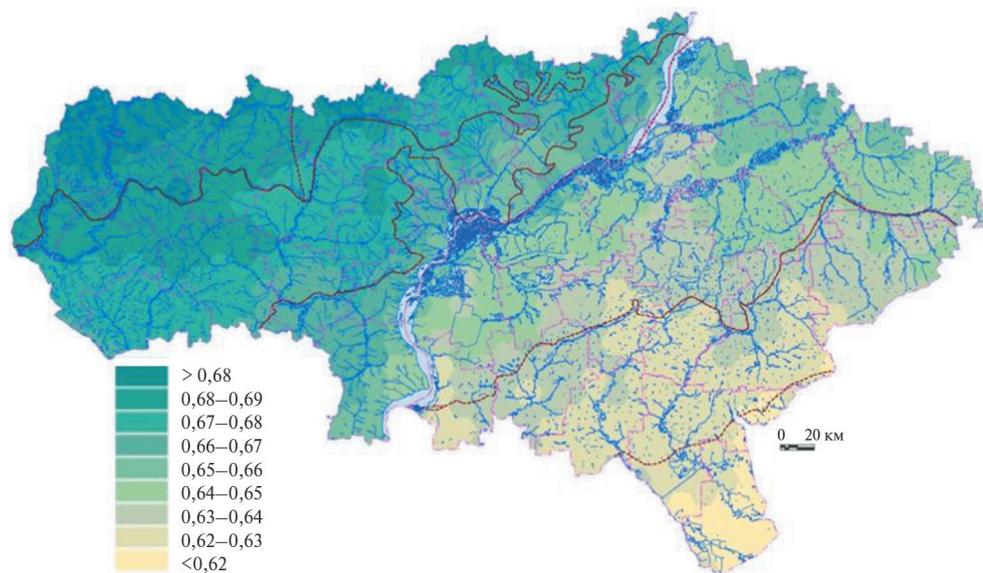


Рис. 5. Карта распределения многолетнего среднего значения облачности по территории Саратовской области по данным спутникового проекта MODIS за 2000–2020 гг.

В картографии оптимальными по площади считаются ячейки, длина сторон которых составляет 2–5 см масштаба карты. В нашем случае из-за низкой плотности основных данных базовая площадь ячеек была уменьшена вдвое и составила от 12 до 192 км².

Была выбрана гексагональная форма ячеек, поскольку шестиугольник образует однородную поверхность без «разрывов» и «пропусков» и обеспечивает лучшую интерполяцию данных.

Анализ карт обнаруживает контраст между величинами облачности. Южные и юго-восточные районы Саратовской области можно отнести к малооблачным — значение облачности варьирует от 6,2 до 6,4. Северные и западные районы характеризуются более высокими значениями облачности — от 6,7 до 6,9.

В целом данные спутникового мониторинга позволяют проводить более детальный анализ облачности в отличие от наземных визуальных наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

- Скляров Ю. А., Червяков М. Ю., Воробьёв В. А., Котума А. И., Фейгин В. М. Особенности распределения альбедо в 2010–2012 годах по данным с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 107–117.
- Суркова Я. В., Червяков М. Ю., Спиряхина А. А., Нейштадт Я. А., Шаркова С. А. Влияния облачности на радиационный баланс Земли по данным спутниковых измерений // Материалы 17-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2019. С. 220. <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2019/7962.htm>.
- Суркова Я. В., Червяков М. Ю. Влияние облачности на радиационный баланс Земли по данным спутниковых измерений // Системы контроля окружающей среды – 2020: тез. докл. Международ. научно-техн. конф. Севастополь, 9–12 нояб. 2020. Севастополь: ИП Куликов А. С., 2020. С. 54.

SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF CLOUDINESS IN THE SARATOV REGION

M. Yu. Chervyakov, E. S. Diyanova

Saratov State University (SSU), Saratov, Russia

The paper considers a comparative analysis of cloudiness in the Saratov region based on data from the NASA Earth Observation Cloud Fraction satellite project and ground-based observations taken from the data archive of the research institute RIHMI-WDC in Obninsk. Spatio-temporal analysis of maps of long-term average cloudiness was carried out.

Keywords: cloudiness, satellite observations, ground-based observations, spatiotemporal variability of cloudiness

Chervyakov MaksimYurievich — head of department, candidate of geographic sciences, chervyakovmu@mail.ru

Diyanova Ekaterina Sergeevna — student

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ РОССИЙСКОГО РАДИОМЕТРА ИКОР-М

М. Ю. Червяков, Е. С. Диянова

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (СГУ)
Саратов, Россия

Рассмотрена изменчивость альbedo на основе многолетних спутниковых данных радиометров ИКОР-М, установленных на борту ИСЗ серии «Метеор-М». Для проверки стабильности радиометров выбраны среднемесячные значения альbedo ячеек сетки, расположенных над двумя пустынями Южного полушария (Атакама и Намиб) и двумя пустынями Северного полушария (Аравия и Сахара). Для всех четырёх территорий приводятся результаты расчётов среднемесячных значений альbedo с октября 2009 г. по август 2019 г. Отдельно были проанализированы пространственно-временные распределения альbedo.

Ключевые слова: альbedo, поглощённая солнечная радиация, радиометр ИКОР-М, спутники

В сентябре 2009 г. был запущен российский метеорологический спутник нового поколения «Метеор-М» № 1 и 8 июля 2014 г. — «Метеор-М» № 2, предназначенные для измерений составляющих радиационного баланса Земли на верхней границе атмосферы. На борту этих спутников были установлены радиометры ИКОР-М (измеритель коротковолновой отражённой радиации), созданные в Саратовском государственном университете им. Н. Г. Чернышевского (СГУ) группой под руководством профессора Ю. А. Склярова. Ранее подобная аппаратура работала на спутниках «Метеор-3» № 7 в 1994–1995 гг. и «Ресурс-О1» № 4 в 1998–1999 гг. (Скляров и др., 2012а).

Радиометр ИКОР предназначен для измерения потоков отражённой коротковолновой солнечной радиации в диапазоне 0,3–4 мкм, в который входят: часть ультрафиолетовой радиации, весь видимый спектр и часть ближней инфракрасной радиации. Результаты регистрации такого спектра отражённой солнечной радиации дают возможность получать значения альbedo и поглощённую солнечную радиацию, отнесённые к верхней границе атмосферы, и осуществлять их мониторинг. Также по полученным результатам строятся карты составляющих радиационного баланса Земли (Червяков 2020а, б).

Прибор ИКОР-М создан в виде единого автономного блока, включающего в себя приёмник излучения и электронную систему управления. Как отмечалось выше, с 2014 г. и по сей день на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Метеор-М» № 2 работает измеритель ИКОР-М, идентичный запущенному в 2009 г. Информация со спутника передаётся в штатном режиме и оперативно пополняет базы данных о составляющих радиационного баланса Земли. (Скляров и др., 2013а)

Радиометры ИКОР-М, установленные на гидрометеорологических спутниках серии «Метеор-М», идентичны. Оба прибора — надирные, со скоростью регистрации потоков отражённой коротковолновой радиации 1 отсчёт/с. Так как оба измерителя были установлены на гелиосинхронных спутниках с похожими параметрами орбиты, то алгоритм и методика обработки результатов у них одинаковы (Червяков, 2018; Spiryakhina, Chervyakov, 2019).

Червяков Максим Юрьевич — заведующий кафедрой, кандидат географических наук, доцент, chervyakovmu@mail.ru

Диянова Елизавета Сергеевна — студентка

Прибор проводит измерения потока отражённой коротковолновой радиации каждую секунду. За сутки спутник совершает 14 витков. Разрешающая способность среднемесячных величин отражённой коротковолновой радиации на верхней границе атмосферы составляет $2,5 \times 2,5^\circ$ дуги большого круга (Скляров и др., 2012а).

Для расчётов среднемесячных величин отражённой коротковолновой радиации, альbedo и поглощённой радиации используется массив равных по площади ячеек, на которые разбивается вся поверхность Земли, размером $2,5 \times 2,5^\circ$ в длинах дуги большого круга Земли.

В Саратовском госуниверситете осуществляется регулярный приём и накопление данных измерений с помощью радиометра ИКОР-М. На сайте лаборатории исследования составляющих радиационного баланса Земли СГУ (<https://www.sgu.ru/structure/geographic/metclim/balans>) оперативно выкладывались карты глобального распределения на верхней границе атмосферы среднемесячных значений альbedo, потоков уходящей коротковолновой и поглощённой солнечной радиации (Скляров и др., 2012б, 2013а).

Получение среднемесячных значений альbedo и поглощённой радиации, широтного распределения этих величин, глобальных значений альbedo и поглощённой радиации осуществляется в программе редактирования и анализа полей IKOR Fields Editor. В ней были сделаны шаблоны для расчёта среднемесячных значений альbedo ячеек сетки, расположенных над двумя пустынями Южного полушария (Атакама и Намиб) и двумя пустынями Северного полушария (Аравия и Сахара). Для этих регионов были выбраны ключевые точки-ячейки, по которым снимались значения альbedo. В работе использовались данные альbedo, полученные в период с ноября 2009 г. по август 2019 г. На рис. 1 представлен ход среднемесячных величин альbedo для четырёх выбранных зон, полученных с помощью радиометра ИКОР-М на ИСЗ «Метеор-М» №1.

В течение всего периода наблюдений измерителем ИКОР-М (с октября 2009 г. по август 2014 г.) происходит медленный спад показаний (см. рис. 1). Это связано, возможно, с тем, что на чувствительный элемент датчика постепенно оседали пыль и другие продукты собственной атмосферы космического аппарата. Результат подобного воздействия обычно называют эффектом старения аппаратуры (Богданов и др., 2016).

Ещё одним возможным источником старения измерителя представляется объёмное радиационное окрашивание стекла, используемого в качестве фильтра. Этот эффект возникает под действием жёсткого ультрафиолетового и рентгеновского излучения, приводит к уменьшению прозрачности стекла в видимом диапазоне спектра и проявляет себя в уменьшении альbedo всех участков поверхности Земли (Богданов и др., 2022).

Из-за относительно малой величины эффекта старения измерителя ИКОР-М возможно его оценить, и учитывая величину старения анализировать полученные данные.

В работе была также предпринята попытка связать шкалу данного прибора со шкалой аналогичного измерителя, проработавшего на борту ИСЗ «Метеор-М» № 2 с августа 2014 г. по август 2019 г, так как в августе 2014 г. радиометры ИКОР-М с ИСЗ «Метеор-М» № 1 и № 2 проработали совместно, что позволило установить соответствие шкал этих приборов.

На рис. 1 прямыми линиями проведены линейные тренды. На графиках хорошо заметен эффект старения измерителя ИКОР-М, который проявляется в линейном тренде уменьшения данных альbedo.

Стоит отметить, что у второго измерителя ИКОР-М такого тренда не наблюдалось, линии трендов были практически параллельны осям абсцисс, т. е. у него показания стабильны. Таким образом, для данного образца измерителя эффект старения не наблюдается.

Так как имеются два последовательных ряда наблюдений в августе 2014 г., и шкала измерителя второго ИКОР-М является неизменной, то мы можем показания измерителя ИКОР-М привязать к этой шкале.

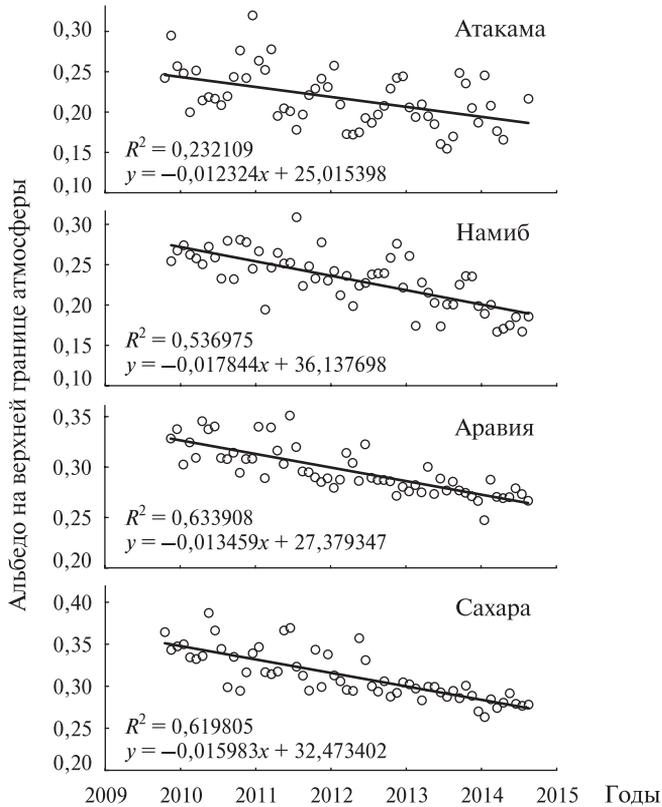


Рис. 1. Альbedo над разными пустынями по данным измерителя ИКОР-М на борту ИСЗ «Метеор-М» № 1 (кружки). Сплошными линиями показаны линейные тренды

После снятия линии тренда у первого радиометра был рассчитан переводной коэффициент. Коэффициент снятия линии тренда с первого радиометра и его привязки ко второму радиометру обозначен как k . Величина этого коэффициента изменяется от 1,075 в первом месяце (октябрь 2009 г.), до 1,408 в последнем месяце (август 2014 г.) наблюдений. Таким образом, для октября, где ещё не наблюдался тренд, величина среднемесячного альbedo умножается на коэффициент 1,075, чтобы привести значения ко второму радиометру. Далее, для того чтобы снять тренд и привести ряд наблюдений первого радиометра к шкале второго нужно посчитать разность между коэффициентами: $1,408 - 1,075$. Получившееся значение поделить на количество месяцев с данными альbedo с октября 2009 г. по август 2014 г.

Основной результат обработки данных наблюдений представлен в виде глобальных карт распределения альbedo, потоков отражённой и поглощённой солнечной радиации. Анализируя карты среднемесячных распределений альbedo, можно выявить территории с максимальными и минимальными значениями альbedo. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены карты распределения альbedo в июле и декабре 2017 г.

В июле 2017 г. наиболее высокие значения альbedo наблюдаются над пустынями, такими как Сахара и Аравийская (достигая значений 30–40 %) и во внутритропической зоне конвергенции. Наиболее высокие значения альbedo наблюдаются также в полярных широтах Северного и Южного полюса, вследствие наличия там снежного и ледяного покрова. Альbedo Гренландии в июле 2017 г. достигает значений от 45 до 60 %.

На рис. 2, в декабре альbedo Антарктиды достигает величин 50–60 %, которая также имеет мощный ледовый и снежный покров. Самые малые значения альbedo наблюдаются в океанах. Минимальные величины альbedo во всех океанах: 10–15 % и наблюдаются вблизи экватора.

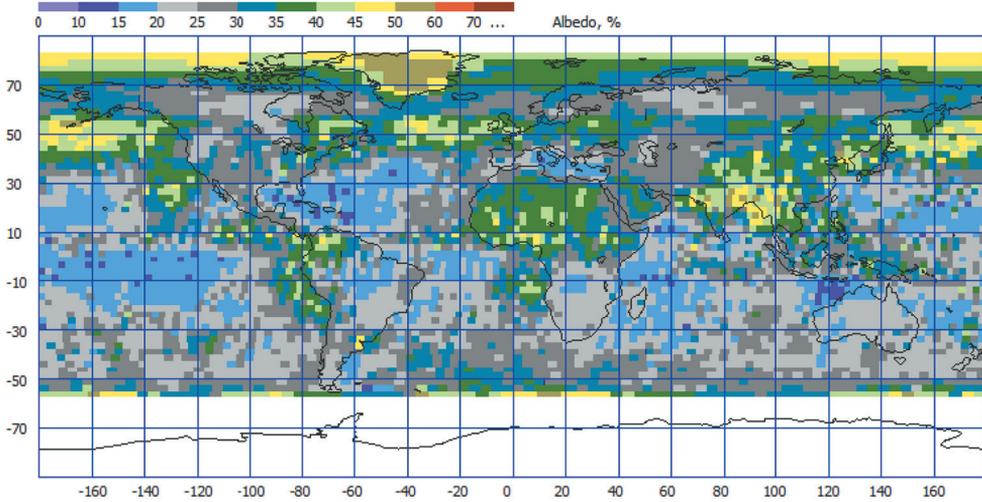


Рис. 2. Карта среднемесячных альbedo по данным измерителя ИКОР-М на борту ИСЗ «Метеор-М» № 2, июль 2017 г.

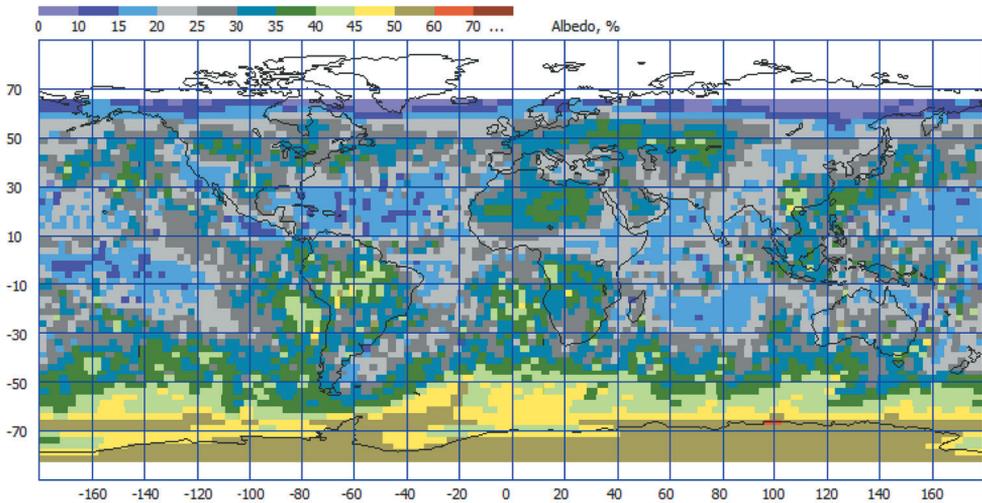


Рис. 3. Карта среднемесячных альbedo по данным измерителя ИКОР-М на борту ИСЗ «Метеор-М» № 2, декабрь 2017 г.

Данные мониторинга составляющих радиационного баланса Земли позволяют проводить оценку изменчивости климата (Богданов, Червяков, 2019; Mogozya et al., 2021a, b). Результаты, полученные в ходе измерений радиометрами ИКОР-М, носят независимый характер и могут быть использованы также для проверки работы других спутниковых проектов.

ЛИТЕРАТУРА

- Богданов М. Б., Червяков М. Ю. Оценка времени реакции и чувствительности земной климатической системы к радиационному воздействию // Изв. Саратов. ун-та. Новая сер. Сер.: Науки о Земле. 2019. Т. 19. Вып. 4. С. 216–223. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-216-223>.
- Богданов М. Б., Воробьев В. А., Котума А. И., Червяков М. Ю. Связь шкал измерителей коротковолновой отраженной радиации ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 1 и № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 252–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-252-260.
- Богданов М. Б., Червяков М. Ю., Кошель А. А. Десятилетний ряд глобального распределения альbedo по данным ИСЗ «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 243–251. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-243-251.
- Скляров Ю. А., Воробьев В. А., Котума А. И., Червяков М. Ю., Фейгин В. М. (2012а) Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ «Метеор-М» № 1. Аппаратура ИКОР-М // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 173–180.
- Скляров Ю. А., Воробьев В. А., Котума А. И., Червяков М. Ю., Фейгин В. М. (2012б) Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 83–90.
- Скляров Ю. А., Червяков М. Ю., Воробьев В. А., Котума А. И., Фейгин В. М. (2013а) Некоторые результаты обработки данных поглощенной солнечной радиации и альbedo, полученных с помощью аппаратуры ИКОР-М // Изв. Саратов. ун-та. Новая сер. Сер.: Науки о Земле. 2013. Вып. 2. Т. 13. С. 30–33.
- Скляров Ю. А., Червяков М. Ю., Воробьев В. А., Котума А. И., Фейгин В. М. (2013б) Особенности распределения поглощенной солнечной радиации в 2010–2012 годах по данным с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 272–283.
- Скляров Ю. А., Червяков М. Ю., Воробьев В. А., Котума А. И., Фейгин В. М. (2013в) Особенности распределения альbedo в 2010–2012 годах по данным с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 107–117.
- Червяков М. Ю. (2020а) Результаты десятилетней работы измерителей коротковолновой отраженной радиации ИКОР-М на гидрометеорологических спутниках серии «Метеор-М» // Актуальные проблемы контроля окружающей среды: материалы семинара, Севастополь, 10–11 нояб. 2020. Севастополь: Куликов А. С., 2020. С. 12.
- Червяков М. Ю. (2020б) Цифровая география: материалы Всероссийской научно-практ. конф. с международ. участием. Пермь, 16–18 сент. 2020. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020. В 2 т. Т. 1. Цифровые и геоинформац. технологии в изучении природ. процессов, экологии, природопользовании и гидрометеорологии. С. 451–454.
- Червяков М. Ю., Кулькова Е. В., Суркова Я. В., Спиряхина А. А., Нейштадт Я. А., Шаркова С. А., Капцова Е. И., Руденко Н. О., Полянский А. В., Цыплухина П. В. Пространственно-временная изменчивость альbedo и поглощенной солнечной радиации в Арктике в период с 2009 по 2018 г. по данным спутниковых измерений // Сб. тез. докл. 16-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2018. С. 232. <http://conf.rse.geos-mis.ru/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6938>.

Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Chervyakov M. Yu., Denisov K. E., Solodovnikov A. P., Semenova N. V. (2021a) Estimation of the response of The Earth's climatic system to the growth of carbon dioxide gas content in the atmosphere // Proc. 27th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. Art. No. 1191670. 5 p. <https://doi.org/10.1117/12.2603938>.

Morozova S. V., Denisov K. E., Polyanskaya E. A., Chervyakov M. Yu., Pryakhina S. I., Ormeli E. I. (2021b) Climatic variability forecast based on feedback relations // Proc. 27th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. Art. No. 119166Y. 9 p. <https://doi.org/10.1117/12.2603727>.

Spiryakhina A. A., Cherviakov M. Yu. Research of the components of the earth radiation balance at the top of the atmosphere during the El Nino (La Nina) events in the Pacific Ocean // Представляем научные достижения миру. Естественные науки: материалы 9-й Науч. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2019. Вып. 8. С. 160–164.

SATELLITE MONITORING OF THE COMPONENTS OF THE EARTH'S RADIATION BALANCE ACCORDING TO THE RUSSIAN RADIOMETER IKOR-M

M. Yu. Chervyakov, E. S. Diyanova

Saratov State University (SSU), Saratov, Russia

The paper considers the variability of the albedo values based on long-term satellite data from the IKOR-M radiometers installed aboard the Meteor-M satellites. To test the stability of the radiometers, we chose the monthly average albedo values of grid cells located over two deserts of the Southern Hemisphere (Atacama and Namib) and two deserts of the Northern Hemisphere (Arabia and Sahara). For all four territories, the results of calculations of the average monthly albedo values from October 2009 to August 2019 are presented. The spatiotemporal distributions of the albedo were analyzed separately.

Keywords: albedo, the absorbed solar radiation, radiometer IKOR-M, satellites

Chervyakov MaksimYurievich — head of department, candidate of geographic sciences, chervyakovmu@mail.ru

Diyanova Elizaveta Sergeevna — student

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

А. А. Чересов, М. Ю. Червяков

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (СГУ), Саратов, Россия

Проведена оценка характеристик мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) за тёплые периоды 2016–2021 гг. на основе спутниковых изображений в Саратовской обл. Выявлено, что чаще всего МКК наблюдались в июне, в то время как их размеры и по площади, и по протяжённости несколько меньше, чем те же характеристики в мае и июле.

Ключевые слова: мезомасштабный конвективный комплекс, линия шквалов, спутниковая информация

Каждый год по данным спутниковых изображений над районами Поволжья отмечается множество случаев перемещения мезомасштабных облачных систем глубокой конвекции, которые сопровождаются обильными осадками, градом и шквалистым усилением ветра.

Под мезомасштабными конвективными системами (МКС) считают ансамбль грозовых штормов, производящий сплошную зону осадков масштаба не менее 100 км (Абдуллаев, 2010). Понятие МКС включает большой диапазон форм и масштабов систем глубокой конвекции от линий шквалов, скоплений локальных штормов, мезомасштабных конвективных комплексов до систем осадков атмосферных фронтов (Асмус и др., 2008).

Анализ и прогноз образования и развития МКС, их положения в пространстве, а также интенсивности связанных с ними опасных явлений (ОЯ), представляет немалое внимание для практики, особенно в условиях меняющегося климата (Червяков, 2012; Mогозова et al., 2021a, b). Поскольку большинство случаев ОЯ связано с МКС масштаба мезо- α , то особенно важно рассмотрение именно таких систем — мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) и линий шквалов (ЛШ). Интерес к мезомасштабным системам обусловлен тем, что с ними связаны опасные явления погоды, причиняющие большой экономический ущерб. К таким явлениям относятся сильные шквалистые ветры, грозозависная активность и интенсивные ливневые осадки, вызывающие паводки.

Мезомасштабные конвективные комплексы (МКК), имея небольшой период существования, являются трудно прогнозируемым объектом. Обнаруживается такая облачность обычно только с помощью радиолокационных наблюдений или данных метеорологических спутников Земли (рис. 1). Необходимость применения данных дистанционного зондирования Земли при организации мониторинга и прогнозирования опасных природных явлений не вызывает сомнений. В последние годы их роль как источника информации об опасных природных явлениях неуклонно увеличивается (Ленская, 2006).

Поскольку МКК формируется в результате перегрева отдельных масс воздуха при неустойчивой стратификации атмосферы в её нижних слоях, то над сушей наиболее оптимальные условия для его возникновения создаются в тёплую половину года в зонах пониженного давления атмосферы (Нейштадт и др.,

Чересов Антон Александрович — студент бакалавриата, cheresov01@bk.ru

Червяков Максим Юрьевич — заведующий кафедрой, кандидат географических наук, chervyakovmu@mail.ru

2021). Скорость восходящих потоков, вертикальная мощность и водность образующегося мезомасштабного конвективного комплекса зависят от степени неустойчивости атмосферы. На этом основаны практически все существующие в настоящее время методы прогноза опасных явлений погоды, обусловленные конвекцией (Горбатенко и др., 2011; Червяков, 2020).

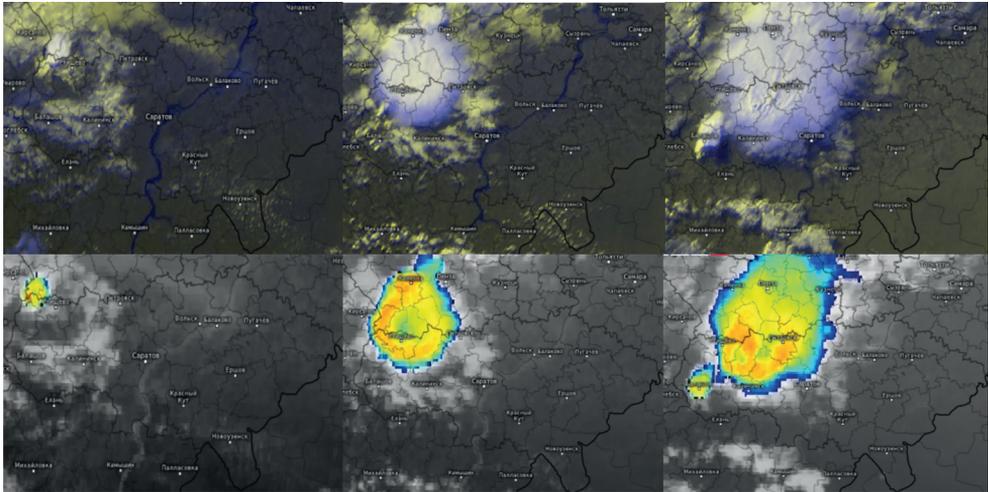


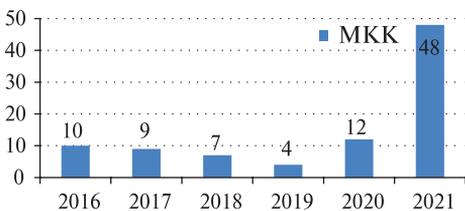
Рис. 1. Динамика развития МКК 13 июня 2020 г. на северо-западе Саратовской области по данным спутника Meteosat-8. Время снимков: 15:15–19:15 (время местное). URL: <https://meteologix.com/ru>.

В качестве материалов для исследования были использованы изображения облачного покрова со спутника Meteosat-8 за тёплый период с 2016 по 2021 г. на территории Саратовской области.

Для дифференцирования облачного покрова на территории Саратовской области был выбран период исследования 2016–2021 гг., выделены даты тёплого периода года (170 дней в году), что составило 1020 снимков облачности, рассмотрены отдельные облачные составляющие МКС, такие как ЛШ и МКК.

Наибольшая повторяемость числа дней с мезомасштабными явлениями с 2016 по 2021 г. за тёплый период в Саратовской области наблюдается у МКК и скоплений кучево-дождевых облаков, наименьшую повторяемость имеют ЛШ.

При анализе общих закономерностей распределения повторяемости объектов мезомасштаба 2021 г. выделяется, как год с наибольшей повторяемостью дней с МКК на исследуемой территории. Максимум числа дней с МКК и скоплениями кучево-дождевых облаков составляет 48 дней в 2021 г. (рис. 2). Вместе с тем, выделяются 2017 и 2018 гг., где отмечается максимум повторяемости числа дней с ЛШ. Их максимальная повторяемость составляет по 2 дня.



МКК достигают своего пика активности в июне, а максимум повторяемости числа дней с ЛШ приходится на май и июль.

Рис. 2. Число дней с мезомасштабными явлениями за тёплый период 2016–2021 гг. по данным спутника Meteosat-8

Начало развития мезомасштабных явлений приходится в послеполуденное время. Максимальное значение случаев приходится на 15 часов дня (по местному времени UTC+4, *англ.* Coordinated Universal Time).

Чаще всего наблюдаются МКК небольших площадей до 12 500 км². Однако фронтальные МКК могут достигать и гораздо больших размеров — до 27 500 км².

ЛИТЕРАТУРА

- Абдуллаев С. М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем (концепция, климатология и прогноз): дис. ... д-ра геогр. наук. Челябинск, 2010. 407 с.
- Асмус В. В., Кровотынцев В. А., Милехин О. Е., Соловьев В. И., Успенский А. Б.* Использование спутниковых данных ДЗЗ для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИЭМ, 2008. Т. 105. С. 6–16.
- Горбатенко В. П., Константинова Д. А., Золотухина О. И., Тунаев Е. Л.* Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 11. С. 148–155.
- Ленская О. Ю.* Мезомасштабная организация и эволюция систем осадков на юге Бразилии: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2006. 220 с.
- Нейштадт Я. А., Митюкова Е. И., Червяков М. Ю.* Спутниковый мониторинг температуры поверхности в городах Саратовской области // Шаг в науку: сб. материалов 4-й Международ. научно-практ. конф. с участием студентов. Грозный, 15.10.2021. Махачкала: АЛЕФ, 2021. С. 341–345.
- Червяков М. Ю.* Оценочные доклады Межправительственной группы экспертов по изменению климата // Экология: синтез естественнонауч., техн. и гуманитар. знания: материалы 3-го Всероссийского научно-практ. форума и 1-й Школы интерэкоправа. Саратов, 10–12 окт. 2012 / редкол. А. В. Иванов, И. А. Яшков, Е. А. Высторобец и др.; Сарат. гос. тех. ун-т им. Ю. А. Гагарина. Саратов: Изд-во ЕврАзНИИПП, 2012. С. 65–67.
- Червяков М. Ю.* Изменчивость температуры воздуха в городских агломерациях Саратовской области по данным спутникового спектро радиометра MODIS // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 нояб. 2020, ИКИ РАН. 2020. С. 184. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Chervyakov M. Yu., Denisov K. E., Solodovnikov A. P., Semenova N. V.* (2021a) Estimation of the response of The Earth's climatic system to the growth of carbon dioxide gas content in the atmosphere // Proc. 27th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. Art. No. 1191670. 5 p. <https://doi.org/10.1117/12.2603938>.
- Morozova S. V., Denisov K. E., Polyanskaya E. A., Chervyakov M. Yu., Pryakhina S. I., Ormeli E. I.* (2021b) Climatic variability forecast based on feedback relations // Proc. 27th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. Art. No. 119166Y. 9 p. <https://doi.org/10.1117/12.2603727>.

SATELLITE MONITORING OF MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEMS IN THE SARATOV REGION

A. A. Cheresov, M. Yu. Chervyakov

Saratov State University (SSU), Saratov, Russia

This article evaluates the characteristics of mesoscale convective complexes (MCCS) for the warm periods of 2016–2021 based on satellite images in the Saratov region. As a result of the analysis, it was revealed that the MCCS were most often observed in June, while their size and area and length are somewhat smaller than the same characteristics in May and July.

Keywords: mesoscale convective complex, squall line, satellite information

Cheresov Anton Alexandrovich — undergraduate student, cheresov01@bk.ru

Chervyakov Maxim Yurievich — head of the department, candidate of geographic sciences, chervyakovmu@mail.ru

ЭФФЕКТЫ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СЖИМАЕМОСТИ В НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЧЕНИЯХ МЕЛКОЙ ВОДЫ

М. А. Юденкова^{1,2}, Д. А. Климачков², А. С. Петросян^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия

² Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

Классические уравнения мелкой воды выступают альтернативой решению замкнутой системы гидродинамических уравнений в гравитационном поле. Однако классическое приближение не учитывает неоднородность плотности слоя жидкости. В работе рассматривается приближение мелкой воды, обобщённое для описания крупномасштабных сжимаемых течений в поле тяжести со свободной поверхностью. Получена система квазилинейных дифференциальных уравнений, описывающая течение сжимаемой жидкости в приближении мелкой воды. Решения системы находятся в виде линейных волн Пуанкаре на f -плоскости, волн Пуанкаре и Россби на бета-плоскости. Решения получены для новой переменной, нелинейно зависящей от высоты свободной поверхности, поэтому волновая динамика отличается от случая несжимаемой жидкости. Нелинейная динамика найденных волн исследуется методом многомасштабных разложений. Для каждого случая трёхволновых взаимодействий исследованы параметрические неустойчивости и найдены коэффициенты взаимодействия трёх волн в сжимаемой жидкости на бета-плоскости.

Ключевые слова: приближение мелкой воды, крупномасштабная сжимаемость, волны Пуанкаре, волны Россби

Исследуется влияние сжимаемости и вращения на нелинейную динамику волн в приближении мелкой воды. Приближение мелкой воды обобщается для описания крупномасштабных течений сжимаемой жидкости со свободной поверхностью, рассматриваются линейные волны для различных приближений вращения, исследуются слабонелинейные взаимодействия полученных волн.

Методом усреднения по высоте полной системы гидродинамических уравнений получена система дифференциальных уравнений движения вращающейся сжимаемой жидкости в поле силы тяжести со свободной границей в приближении мелкой воды (Yudenkova et al., 2022):

$$\frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial(lu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(lu_y)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial(lu_x)}{\partial t} + \frac{\partial(lu_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(lu_x u_y)}{\partial y} + a^2 g \frac{\partial l}{\partial x} - fl u_y = 0,$$

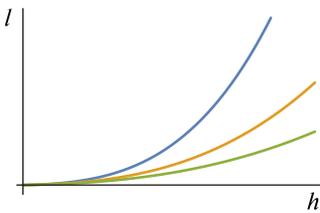
$$\frac{\partial(lu_y)}{\partial t} + \frac{\partial(lu_x u_y)}{\partial x} + \frac{\partial(lu_y^2)}{\partial y} + a^2 g \frac{\partial l}{\partial y} + fl u_x = 0.$$

Здесь l — поверхностная плотность слоя; u_x, u_y — усреднённые по высоте скорости; $a^2 g$ — квадрат скорости малых возмущений; f — параметр Кориолиса.

Юденкова Мария Алексеевна — студентка магистратуры, yudenkova.ma@phystech.edu

Климачков Дмитрий Александрович — кандидат физико-математических наук

Петросян Аракек Саркисович — профессор, доктор физико-математических наук



Зависимость новой переменной l от высоты h при различных коэффициентах адиабаты γ : $\gamma = 1,6$ — нижняя кривая, $\gamma = 1,5$ — средняя кривая; $\gamma = 1,4$ — верхняя кривая

Полученная система уравнений нелинейно зависит от характерного вертикального масштаба течения и масштаба высот, на котором изменение плотности становится существенным. В отличие от классических уравнений мелкой воды для несжимаемых течений, высота свободной поверхности не может считаться аналогом массы столба жидкости, и закон сохранения массы записывается для новой переменной $l = h\bar{\rho}$ — поверхностной плотности жидкости. Высота столба жидкости нелинейно зависит от переменной l (рисунок, величины безразмерные). Характерный масштаб сжимаемости — плотностная высота $H_\rho = c_p T/g$. Если высота столба жидкости много меньше характерной плотностной высоты, то эффекты сжимаемости становятся несущественными, а полученная система уравнений в пределе переходит в классическую систему уравнений мелкой воды.

Рассматриваются два типа вращения — приближение f -плоскости и бета-плоскости. В первом случае параметр Кориолиса считается постоянным: $f = f_0 = \text{const}$. В приближении бета-плоскости параметр Кориолиса линейно зависит от широты $f = f_0 + \beta y$. Характерной величиной для исследования вращения — радиус деформации Россби $L \sim \sqrt{g/f_0}$. В длинноволновом пределе, т. е., когда длина волны много больше радиуса деформации L , на f -плоскости возникают инерционные колебания, а на бета-плоскости — волны Россби. В коротковолновом пределе на f - и бета-плоскостях возникают волны Пуанкаре.

Анализ дисперсионных соотношений показал, что на f -плоскости невозможны трёхволновые взаимодействия волн Пуанкаре в сжимаемой жидкости, а на бета-плоскости возможны трёхволновые взаимодействия для трёх волн Россби в сжимаемой жидкости, а также двух волн Россби и одной волны Пуанкаре в сжимаемой жидкости. На бета-плоскости асимптотическим методом многомасштабных разложений получены нелинейные уравнения на амплитуды взаимодействующих волн. Для каждого случая трёхволновых взаимодействий исследованы параметрические неустойчивости и найдены коэффициенты взаимодействия трёх волн в сжимаемой жидкости на бета-плоскости.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис».

ЛИТЕРАТУРА

Yudenkova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S. Poincare Waves and Rossby Waves in Compressible Shallow Water Flows // J. Experimental and Theoretical Physics. 2022. V. 134. No. 3. P. 327–339. DOI: 10.1134/S1063776122020091.

EFFECTS OF LARGE-SCALE COMPRESSIBILITY IN NONLINEAR WAVE DYNAMICS IN ROTATING SHALLOW WATER FLOWS

M. A. Yudenkova^{1,2}, *D. A. Klimachkov*², *A. S. Petrosyan*^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

² Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

The classical shallow water equations are an alternative to solving the closed system of hydrodynamic equations in the gravity field. However, the classical approximation does not consider the density inhomogeneity of the liquid layer. Here we show the shallow water approximation generalized to describe large-scale compressible flows in the gravity field with a free surface. We have obtained the system of quasi-linear differential equations that describes the flow of a compressible liquid in the shallow water approximation. Solutions to the obtained system are found in the form of linear Poincaré waves on the f -plane, Poincaré and Rossby waves on the beta-plane. The solutions are obtained for the new variable nonlinearly related to the height of free surface, thus the wave dynamics differs from the incompressible case. The solutions are obtained for the new variable nonlinearly related to the height of free surface, thus the wave dynamics differs from the incompressible case. The nonlinear dynamics of the obtained waves in compressible flows is studied by the method of multi-scale expansions. The resulting three-wave equations for the amplitudes of interacting waves are analyzed for any parametric instability and their increments are found.

Keywords: shallow water theory, large-scale compressibility, Poincaré waves, Rossby waves

Yudenkova Maria Alekseevna — master's degree student, yudenkova.ma@phystech.edu

Klimachkov Dmitry Alexandrovich — candidate of physical and mathematical sciences

Petrosyan Arakel Sarkisovich — professor, doctor of physical and mathematical sciences

ПРОВЕДЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НАВЕДЕНИЮ ЛУННОГО МАНИПУЛЯТОРНОГО КОМПЛЕКСА НА РАЗЛИЧНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ЕГО РАБОЧЕЙ ЗОНЕ

В. А. Яковлев, М. Л. Литвак, Т. О. Козлова, Я. Д. Эльяшев, И. А. Дзюбан, А. В. Никитин

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

Представлены результаты наземных отладочных работ, проведённых в ИКИ РАН с лунным манипуляторным комплексом (ЛМК), разработанным для посадочной миссии «Луна-25». В ходе работ отработывалось взаимодействие ЛМК с другими приборами, входящими в комплекс научной аппаратуры «Луна-25»: лазерным ионизационным масс-спектрометром (ЛАЗМА-ЛР), стационарной телевизионной системой (СТС-Л) и ИК-спектрометром и стереокамерой (ЛИС-ТВ-РПМ). Совместная работа этих приборов должна обеспечить точное наведение ЛМК в рабочей зоне, копание лунного реголита, забор пробы, последующую её транспортировку и анализ элементного и изотопного состава лунного реголита.

Ключевые слова: лунный реголит, манипуляторный комплекс, элементный анализ, проба грунта, Луна, посадочный аппарат, наземные отработки, ИК-спектрометрия

ВВЕДЕНИЕ

«Луна-25» — российская автоматическая лунная станция, место посадки которой впервые выбрано в южных приполярных широтах. Запуск миссии запланирован на 2022 г. В её приоритетные научные задачи включено изучение минералогического, химического, изотопного состава лунного реголита, а также поиск летучих соединений (в том числе водяного льда и органических соединений) в приповерхностном слое реголита высокоширотных областей Луны (Казмерчук, Ширшаков, 2021; Митрофанов и др., 2021).

В состав комплекса научной аппаратуры (КНА) космического аппарата (КА) «Луна-25» входит лунный манипуляторный комплекс (ЛМК), состоящий из двухзвенного манипулятора, оснащённого ковшом и грунтозаборным устройством, лунного инфракрасного спектрометра и телевизионной камеры рабочего поля манипулятора (ЛИС-ТВ-РПМ), которые установлены на манипуляторе и могут им наводиться на различные объекты (камни, обломки породы, грунт на дне вырытой траншеи, выкопанный лунный грунт и т. д.) на поверхности Луны (Литвак и др., 2021; Манцевич и др., 2021). Кроме этого, в верхней части посадочного аппарата установлена служебная телевизионная система лунного посадочного модуля (СТС-Л), часть камер которой отвечает за панорамную съёмку, а часть (стереокамера) — за выход манипулятора в заданную точку копания/забора проб грунта и за прецизионное наведение в лазерный ионизационный масс-спектрометр (ЛАЗМА-ЛР), в которой манипулятор должен доставить образцы лунного грунта (Аванесов и др., 2021; Чумиков и др., 2021).

Яковлев Владислав Александрович — инженер, аспирант, yakovlev@rssi.ru

Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией,

доктор физико-математических наук, профессор РАН

Козлова Татьяна Олеговна — заведующая лабораторией

Эльяшев Яков Дмитриевич — младший научный сотрудник

Дзюбан Илья Андреевич — младший научный сотрудник

Никитин Андрей Владимирович — старший научный сотрудник

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОТРАБОТКИ

Во время работ на поверхности Луны важно иметь возможность выбирать наиболее интересные участки лунного грунта в окрестности посадочного аппарата, а в те из них, которые лежат в пределах рабочей зоны ЛМК, уметь наводить манипулятор, забирать там пробы грунта (с разной глубины) и затем быстро и безопасно доставлять их в аналитический прибор ЛАЗМА-ЛР. Чтобы добиться этого, необходимо использовать и уметь правильно координировать работу всех четырёх приборов (ЛМК, СТС-Л, ЛИС-ТВ-РПМ, ЛАЗМА-ЛР) на поверхности Луны (Литвак и др., 2021). Главная задача — это взятие и анализ пробы лунного вещества (Казмерчук, Ширшаков, 2021; Митрофанов и др., 2021).

Для определения места, откуда будет браться проба, используются снимки, полученные стереокамерами СТС-Л. При анализе снимков научная команда ЛМК получает от научной команды СТС-Л точные координаты (азимут, радиус и высота, см. например рис. 1, где показана сетка по азимуту и радиусу) места в системе координат ЛМК и по этим координатам манипуляторный комплекс наводится в интересующую точку на поверхности Луны для последующей процедуры копания. Для более точного наведения могут использоваться снимки, полученные с ТВ-РПМ. При доставке образцов грунта в прибор ЛАЗМА-ЛР необходимо проконтролировать, что траектория движения манипулятора выбрана оптимальным образом для обеспечения точечной доставки образца грунта в небольшое приёмное окно диаметром 8 мм ЛАЗМА-ЛР. Для решения этой задачи также необходимо использовать снимки с камер СТС-Л и ТВ-РПМ.



Рис. 1 Результат наведения ЛМК с помощью СТС-Л

Чтобы обеспечить эту комплексную работу в 2021–2022 гг., были выполнены наземные отработки, в ходе которых проводилось «обучение» ЛМК в разных условиях с использованием данных различных приборов из состава КНА.

ОПИСАНИЕ ОТРАБОТКИ ГРУППЫ ПРИБОРОВ ИЗ КНА

Наведение ЛМК с помощью СТС-Л

В рабочей зоне перед аппаратом «Луна-25» после посадки будут проводиться работы, связанные с выбором оптимальных мест пригодных для забора грунта. Для этого предполагается использовать фотографии, полученные с камер СТС-Л. На полученных снимках по различным критериям (научная привлекательность, возможность доступа ЛМК, рельеф, наличие камней, освещённость,

загрязнённость отработанным топливом и т.п.) будет определяться список мест, которые пригодны для забора проб грунта. Чтобы обеспечить наведение и попадание ЛМК в заданную точку, необходимо перевести систему координат СТС-Л в систему координат ЛМК и получить координаты ЛМК выбранной точки: азимут, радиус и высота.

Для осуществления этого перехода были проведены специальные наземные отработки, где манипулятору задавались 36 точек (положений). В каждом положении СТС производил съёмку ЛМК и объединял все полученные данные. После чего была аналитически создана и затем экспериментальным образом проверена матрица перехода системы координат СТС-Л в систему координат ЛМК.

В ходе проверки использовались монеты номиналом в десять рублей, которые случайным образом располагались на поверхности рабочей зоны ЛМК (см. рис. 1). СТС-Л делал их фотографии и рассчитывал по ним координаты ЛМК. В первую очередь отработка проводилась только с координатной сеткой ЛМК. Она наносилась на поверхность, которая имитировала поверхность лунного грунта (см. рис. 1). Это было необходимо, чтобы оценить погрешность попадания. Затем проводились работы уже с самим грунтом (аналог работы на лунной поверхности, см. рис. 1). Эта часть отработок была сначала сделана на стенде в ИКИ РАН, после чего повторена ещё раз в Научно-производственном объединении им. С. А. Лавочкина (НПО Лавочкина), когда штатный образец (ШО) ЛМК был установлен на космическом аппарате.

Подводя итоги, можно сказать, что эта часть обучения взаимодействия ЛМК и СТС-Л была проведена успешно: было показано, что грунтозаборник ЛМК наводится на монету с погрешностью в 3–5 мм, т.е. всегда попадает в неё (см. рис. 1).

Доставка пробы грунта в аналитический прибор ЛАЗМА-ЛР

Когда выбор и наведение ЛМК на место копания и забор образца грунта были отработаны, наступила очередь отработки доставки грунта в прибор ЛАЗМА-ЛР. Для этого также используется переход от системы координат СТС-Л к системе координат ЛМК (матрица перехода, полученная в предыдущей задаче), но есть и дополнительные действия, которые должны быть совершены перед транспортировкой грунта в прибор.

В связи с тем, что прибор находится на аппарате и имеет очень небольшое приёмное окно, все движения ЛМК должны быть очень точными. Необходимо доставить образец в приёмное окно и избежать столкновений ЛМК с элементами космического аппарата и самим прибором ЛАЗМА-ЛР. Соответствующие наземные отработки были поделены на две части. В первой части ЛМК выводился в так называемую точку коррекции с относительными координатами 0, 60, 60 мм от приёмного окна ЛАЗМА-ЛР. Это безопасная точка, в которую манипулятор можно привести автоматически без риска столкновений с чем-либо на космическом аппарате. Из этой точки в режиме ручного управления создавалась безопасная траектория, позволяющая вывести грунтозаборник точно над приёмным окном ЛАЗМА-ЛР (рис. 2). Сначала эта траектория отработывалась на стенде в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН), а затем была доработана в НПО Лавочкина после установки ШО ЛМК на космическом аппарате, чтобы учесть финальную компоновку КА, прокладку кабелей и ЭВТИ в окрестности ЛАЗМА-ЛР.

Вторая часть работ была необходима, чтобы уметь вносить изменения в траекторию движения в прибор ЛАЗМА-ЛР, если того потребуют обстоятельства на поверхности Луны.



Рис. 2. Доставка и высыпание пробы в приёмное окно ЛАЗМА-ЛР

К ним относятся механические (небольшие деформации конструкции КА при посадке) и тепловые (из-за больших перепадов температуры) деформации. В связи с этим в ходе наземных отработок были сделаны фотографии ЛМК вблизи ЛАЗМА-ЛР с помощью СТС-Л и ТВ-РПМ, чтобы зафиксировать взаимное расположение ЛМК и ЛАЗМА-ЛР в точке коррекции. Такие же фотографии будут сделаны и на Луне после посадки. Если будет обнаружено расхождение (из-за деформаций ЛМК может отклониться от заданной точки коррекции), то с помощью этих фотографий можно внести необходимые коррекции и вернуть ЛМК на правильную траекторию (рис. 3). Для проверки правильности работы алгоритма коррекции проводился так называемый «слепой» тест. В ходе наземных отработок командой экзаменаторов ЛМК искусственно приводился в неправильную точку коррекции, а команде управления ЛМК предлагалось сделать фото его положения с помощью СТС-Л и ТВ-РПМ, сравнить с контрольными снимками, полученными на Земле, и попытаться определить, какие же отклонения от правильного местоположения ЛМК были внесены. Тест проводился многократно и было продемонстрировано, что во всех случаях отклонения от точки коррекции были определены безошибочно.

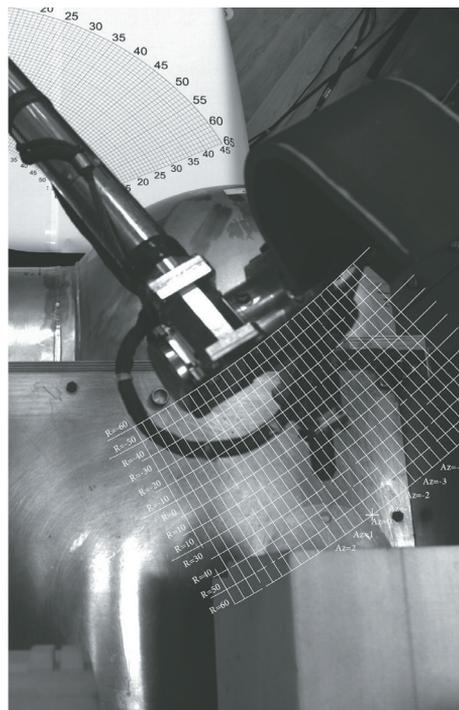


Рис. 3. Наведение ЛМК в точку коррекции в окрестности ЛАЗМА-ЛР

Наведение ЛИС-ТВ-РПМ с помощью ЛМК

При работе на Луне изучение грунта заключается не только в прямом исследовании образцов с помощью ЛАЗМА-ЛР, но и в дистанционном изучении интересных объектов с помощью инфракрасного спектрометра ЛИС, что позволит выяснить их минералогический состав, а в случае с траншеями, выкопанными в процессе взятия образцов для ЛАЗМА-ЛР, проследить динамику испарения летучих веществ с вскрытого грунта на дне траншеи. Для подобных исследований требуется достаточно точно наводить ЛИС как в рабочей зоне ЛМК, так и за её пределами. Для этого необходимо было определить расположение луча зрения ЛИС в системе координат ЛИС-ТВ-РПМ и связать эту подвижную систему координат со статичными системами координат ЛМК и СТС-Л.

Для привязки систем координат ЛИС-ТВ-РПМ была проведена съёмка специального тестового объекта (рис. 4) камерами ТВ-РПМ в пяти разных положениях манипулятора и стереокамеры СТС-Л. После обработки полученных кадров были установлены координаты выбранных точек тестового объекта в системах координат СТС-Л и ТВ-РПМ в нескольких положениях ЛМК, после чего были построены матрицы перехода из одной СК в другую сначала для отдельных положений манипулятора. На их базе была создана программа, вычисляющая матрицы перехода для любого положения манипулятора. После этого с использованием взаимных калибровок СТС-Л и ЛМК были связаны системы координат ЛИС-ТВ-РПМ и ЛМК.



Рис. 4. Съёмка тестового объекта ТВ-РПМ

После определения матриц перехода было проведено контрольное наведение ЛИС на источник света. Для этого источник света, поставленный в случайную точку в поле зрения стереокамер СТС-Л и ТВ-РПМ, был снят камерами, и по их снимкам независимо были определены углы, на которые необходимо повернуть моторы манипулятора так, чтобы источник попал в поле зрения ЛИС. После этого манипулятор был передвинут на указанные углы, и ЛИС получил спектр источника света (рис. 5).

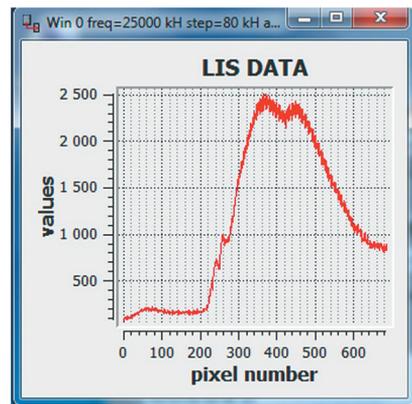


Рис. 5. Спектр ЛИС

Наведение было повторено несколько раз. При расположении источника далеко от аппарата для точного наведения требовалось произвести дополнительный снимок ТВ-РПМ для коррекции положения манипулятора. При этом так как величина углов коррекции достаточно мала, для неё использовался не стереоснимок, а снимок одной камеры ТВ-РПМ.

Управление ЛМК в криовакуумном стенде

Важная задача при создании лунного манипуляторного комплекса заключается в верификации его работоспособности в условиях криогенных температур и низких давлений, которые наблюдаются на поверхности Луны. Для решения этой задачи был создан криовакуумный стенд (КВС), способный имитировать лунную атмосферу и криогенные температуры и позволяющий помещать внутрь ЛМК и образец-аналог лунного реголита, который также может быть заморожен до криогенных температур (Литвак и др., 2021).

При работе манипулятора в условиях, приближённых к лунным, необходимо учитывать как множество внешних факторов, таких как состав, температура и плотность образцов аналогов лунного грунта, процент влажности грунта (включая его распределение по глубине), давление в криовакуумной камере, так и параметры самого манипулятора (температура, потребляемый ток, параметры работы приводов и т. д.).

При проведении работ в КВС (рис. 6) была достигнута температура области копания в $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление в 10^{-2} мм рт. ст. Управление манипулятором проводилось оператором по заранее прописанной траектории, схожей с траекторией копания на Луне. В циклограмму одного копания входило несколько копков на глубину 6–7 см и два забора проб грунта на разной глубине. С учётом погружения грунтаборника максимальная глубина, с которой брались пробы, составляла около 12 см.

Было показано, что мощности ЛМК хватает, чтобы многократно копать и забирать пробы мёрзлого лунного реголита (в необходимом объёме), замороженного до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с содержанием льда 1–1,5 % по массовой доле (см. более подробно работу (Митрофанов и др., 2021)).



Рис. 6. Копание и отбор проб в КВС

Отработка внештатных ситуаций

Управление ЛМК с Земли будет проходить в режиме реального времени в формате отправки пакета команд (циклограмма) и получения обратно данных телеметрии различных параметров ЛМК и фотографий. Все циклограммы управле-

ния сначала обрабатываются на Земле и только потом отсылаются на борт КА, но при этом всегда нужно иметь в виду, что их исполнение на борту может отклониться от штатного сценария. В связи с этим необходимо спрогнозировать и отработать различные нештатные ситуации, которые могут возникнуть, и обучить команду управления ЛМК, как с ними справляться, имея в руках только данные телеметрии и фотографии с СТС-Л и ТВ-РПМ.



Рис. 7. Имитация соприкосновения с тяжёлым объектом (камнем или куском породы)

Ситуации с внешним воздействием на ЛМК для отработки датчиков по скорости и току (ДПС и ДПТ), ситуации с возможным соприкосновением с очень твёрдым грунтом или с тяжёлыми объектами (рис. 7), ситуации потери ЛМК в пространстве и многие другие были неоднократно отработаны в ИКИ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы обеспечить комплексную работу группы приборов из состава КНА в 2021–2022 гг. были выполнены наземные отработки, в ходе которых проводилось «обучение» ЛМК и были решены следующие задачи, необходимые для успешной реализации научной миссии «Луна-25»:

- 1) выполнено наведение ЛМК с помощью СТС-Л на различные участки рабочей зоны ЛМК;
- 2) разработана и верифицирована процедура доставки образцов грунта в приёмное окно ЛАЗМА-ЛР с помощью СТС-Л и ТВ-РПМ;
- 3) выполнено наведение ЛИС-ТВ-РПМ с помощью ЛМК на различные объекты внутри и вне рабочей зоны ЛМК;
- 4) отработано управление ЛМК в лунных условиях (КВС);
- 5) отработаны внештатные ситуации, которые могут возникнуть на Луне;
- 6) созданы базовые циклограммы для работы ЛМК на поверхности Луны.

Наземные отработки проходили сначала в ИКИ РАН с использованием стенда СТИС-ЛМК, имитирующего космический аппарат, и квалификационно-доводочного образца ЛМК. Затем часть операций была верифицирована и повторена в НПО Лавочкина на ШО ЛМК, установленном на КА.

По результатам всех наземных отработок как в нормальных условиях, так и в условиях, приближённых к лунным (работа внутри КВС), была разработана методика управления ЛМК для всех основных операций на поверхности Луны.

ЛИТЕРАТУРА

- Аванесов Г. А., Бережков А. В., Бессонов Р. В., Воронков С. В., Жуков Б. С., Зубарев А. Э., Куделин М. И., Никитин А. В., Полянский И. В., Фори А. А., Эльяшев Я. Д.* Служебная телевизионная система КА «Луна-25» // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 2021. Т. 55. № 6. С. 601–617.
- Казмерчук П. В., Шириаков А. Е.* Космический аппарат «Луна-25» — возвращение на Луну // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 2021. Т. 55. № 6. С. 509–521.
- Литвак М. Л., Козлова Т. О., Ильин А. Г., Киселев А. Б., Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Носов А. В., Папко В. Ф., Третьяков В. И., Яковлев В. А., Слюта Е. Н., Гришакина Е. А., Маковчук В. Ю.* Наземные отработки лунного манипуляторного комплекса проекта «Луна-25» // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 2021. Т. 55. № 6. С. 618–632.
- Манцевич С. Н., Доброленский Ю. С., Евдокимова Н. А., Кораблёв О. И., Калинин Ю. К., Вязоветский Н. А., Дзюбан И. А., Сапгир А. Г., Степанов А. В., Титов А. Ю., Александров К. В., Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Князев М. Г., Докучаев А. Я., Кулаков Ф. В.* Лунный инфракрасный спектрометр с телевизионной поддержкой рабочего поля манипулятора (ЛИС-ТВ-РПМ) // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 2021. Т. 55. № 6. С. 550–561.
- Митрофанов И. Г., Зеленый Л. М., Третьяков В. И., Калашиников Д. В.* «Луна-25»: первая полярная миссия на Луну // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 2021. Т. 55. № 6. С. 497–508.
- Чумиков А. Е., Чепцов В. С., Манагадзе Н. Г., Манагадзе Г. Г.* Лазерный ионизационный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР на борту миссий «Луна-25» и «Луна-27» // *Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы.* 2021. Т. 55. № 6. С. 562–574.

CONDUCTING GROUND-BASED EXPERIMENTS TO GUIDE THE LUNAR MANIPULATOR COMPLEX TO VARIOUS OBJECTS IN WORKING AREA

V. A. Yakovlev, M. L. Litvak, T. O. Kozlova, Ya. D. Elyashev, I. A. Dzyuban, A. V. Nikitin

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

The work on ground-based debugging work carried out at the ICI RAS is presented. A group of scientific instruments from the KPA was used in the work, which includes a lunar manipulator complex (LMC), a laser ionization mass spectrometer (LASMA-LR), a stationary television system (STS-L) and an IR spectrometer and stereo camera (LIS-TV-RPM). The interaction of the devices as a result ensures accurate guidance of the LMC in the working area, sampling, subsequent transportation and analysis of the lunar regolith.

Keywords: lunar regolith, manipulator complex, analysis, soil sample, Moon, apparatus, mining, complex, device

Yakovlev Vladislav Aleksandrovich — engineer, postgraduate, yakovlev@rssi.ru

Litvak Maksim Leonidovich — head of the laboratory, doctor of physical and mathematical sciences, professor RAS

Kozlova Tatyana Olegovna — head of the laboratory

Elyashev Yakov Dmitrievich — junior researcher

Dzyuban Ilya Andreevich — junior researcher

Nikitin Andrey Vladimirovich — senior researcher

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Агапкин И. А.</i> Сравнение гранулометрического состава камчатских пеплов с лунным реголитом	5
<i>Алимшиева М. А., Морозова С. В., Короткова Н. В.</i> Сравнительный анализ климатических полей облачности января и июля в Северном полушарии по спутниковым данным	8
<i>Аморим Д. О., Гудкова Т. В.</i> Модели внутреннего строения Венеры на основе модели Земли PREM.	12
<i>Богодухов М. А., Барталев С. А., Жарко В. О.</i> Развитие методов предварительной обработки стандартного набора данных ATL08 спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 для оценки высоты лесного покрова	19
<i>Воробьев О. П., Петросян А. С.</i> Численное моделирование устойчиво стратифицированной турбулентности в приближении тонкого слоя.	26
<i>Генералова Е. А., Дорофеева В. А.</i> Оценка состава и массы ледяной компоненты в первичных каменно-ледяных планетезиমাлях околосолнечного диска	28
<i>Горбан А. С., Мольков С. В., Цыганков С. С., Муштуков А. А., Лутовинов А. А.</i> Исследование изменения природы спектрального континуума и стабильность циклотронной линии в рентгеновском пульсаре GRO J2058+42	34
<i>Дьячкова М. В., Никифоров С. Ю., Митрофанов И. Г., Лисов Д. И., Литвак М. Л., Санин А. Б.</i> Вариации содержания воды и хлора в грунте Марса вдоль трассы марсохода «Кьюриосити» по данным измерений прибора ДАН	37
<i>Клименко Ю. Т., Сафонов С. И., Федотова М. А., Петросян А. С.</i> Двужидкостное приближение для слабо ионизированной вращающейся космической плазмы. Линейные волны	43
<i>Матвеев Д. А., Демьяненко М. В., Чилингарян И. В., Гришин К. А., Катков И. Ю., Гораджанов В. С., Топтун В. А., Кузьмин И. А.</i> Сравнение методов пост-обработки кривых блеска ZTF для двойной чёрной дыры промежуточной массы J163159.59+243740.3.	47
<i>Менщикова Т. И., Батов А. В., Гудкова Т. В.</i> Толщина коры Венеры методом нагрузочных чисел Лява	56

<i>Митюкова Е. И., Червяков М. Ю.</i> Изменчивость общего содержания озона в атмосфере по данным спутникового инструмента ОМІ во время внезапных стратосферных потеплений	62
<i>Мкртчян А. А., Позаненко А. С., Минаев П. Ю.</i> Влияние мёртвого времени на измерение линейной поляризации в комптоновских детекторах	66
<i>Нежин А. Н., Лыскова Н. С., Хабибуллин И. И.</i> Определение масс и характерных размеров скоплений галактик	72
<i>Нейштадт Я. А., Червяков М. Ю.</i> Спутниковый мониторинг потоков солнечной энергии для целей развития гелиоэнергетики в Саратовской области	84
<i>Никифоров С. Ю., Дьячкова М. В., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Лисов Д. И., Санин А. Б.</i> Результаты обработки данных пассивных измерений прибора ДАН на борту марсохода «Кьюриосити»	92
<i>Николаев А. О., Семенович С. Н., Стецко И. П.</i> Научно-образовательная платформа для тестирования алгоритмов и режимов ориентации сверхмалых космических аппаратов.	98
<i>Павлова М. А., Глуховец Д. И.</i> Применение атмосферной коррекции MUMM к данным спутниковых сканеров цвета и сравнение полученных результатов со стандартным продуктом и судовыми данными.	106
<i>Радивон А. В., Зимовец И. В.</i> Обзор и реализация методов аппроксимации данных для получения кинематических кривых эруптивного протуберанца.	112
<i>Разумов А. Ю. от коллаборации TAIGA</i> Стереоскопический метод поиска сигнала на телескопах TAIGA-IACST	120
<i>Сайгин И. А., Барталев С. А., Стыщенко Ф. В.</i> Развитие методов картографирования растительного покрова	129
<i>Семенюк Е. А., Петросян А. С.</i> Численное моделирование транспорта частиц в дисковых системах	136
<i>Уварова А. В.</i> Сравнение физико-механических свойств вулканических пеплов с полуострова Камчатка со свойствами лунного реголита	138
<i>Фабер Е. Д.</i> Вариации минерального состава отложений в районе равнины Утопия на Марсе по данным CRISM	142
<i>Федотова М. А., Петросян А. С.</i> Линейные волны и нелинейные эффекты в стратифицированной астрофизической плазме	149
<i>Хохлачев А. А., Рязанцева М. О., Ермолаев Ю. И., Рахманова Л. С., Лодкина И. Г.</i> Изменчивость содержания гелия в корональных выбросах массы на средних пространственных масштабах	153
<i>Худышев Ю. С.</i> Сверхкороткий радиоимпульс с частотной манипуляцией на межпланетной трассе	162
<i>Царева О. О., Левашов Н. Н., Попов В. Ю.</i> Атмосферные потери N ₂ и O ₂ во время палеомагнитных инверсий	177

<i>Червяков М. Ю., Диянова Е. С.</i>	
Пространственно-временная изменчивость облачности в Саратовской области	183
<i>Червяков М. Ю., Диянова Е. С.</i>	
Спутниковый мониторинг составляющих радиационного баланса Земли по данным российского радиометра ИКОР-М	187
<i>Чересов А. А., Червяков М. Ю.</i>	
Спутниковый мониторинг мезомасштабных конвективных систем в Саратовской области	193
<i>Юденкова М. А., Климачков Д. А., Петросян А. С.</i>	
Эффекты крупномасштабной сжимаемости в нелинейной динамике волн во вращающихся течениях мелкой воды	197
<i>Яковлев В. А., Литвак М. Л., Козлова Т. О., Эльяшев Я. Д., Дзюбан И. А., Никитин А. В.</i>	
Проведение наземных экспериментов по наведению лунного манипуляторного комплекса на различные объекты в его рабочей зоне	200

19-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 12–13 апр. 2022: сб. тр. / под ред. А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2021. 210 с.

19th Young Scientists Conference “Fundamental and Applied Space Researches”. IKI, Moscow, 13–15 Apr. 2022: proc. / ed. A. M. Sadoski. M.: IKI, 2021. 210 p.

Серия «Механика, управление, информатика»

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Подписано в печать 14.09.2022
 Формат 70×100/16
 Усл. печ.-л. 17,06
 Тираж 150
 Заказ 4199